

建設工事における自然由来重金属等含有 岩石・土壌への対応マニュアル (暫定版)

平成 22 年 3 月

建設工事における自然由来重金属等含有土砂への
対応マニュアル検討委員会

はじめに

我が国には、ひ素や鉛など重金属等を含む岩石や土壌が広く分布していることより、建設現場でもこのような岩石や土壌に遭遇する機会を避けえない。そのため、建設発生土等からの有害な重金属等の漏出を防止するための適切な対応が求められている。

平成 14 年に「土壌汚染対策法」(平成十四年法律第五十三号)(以下、「法」という)が制定され、平成 15 年 2 月 15 日に施行されたが、「自然的原因により有害物質が含まれる土壌」については法の対象外とされた(「土壌汚染対策法の施行について」(平成 15 年 2 月 4 日 環水土第 20 号 環境省環境管理局水環境部長通知)。

そのため、建設工事の発注者は、自然由来の重金属等が含まれる岩石や土壌が発見された場合には、必要に応じて技術検討委員会等を立ち上げるなど個別に対策を実施してきた。

このため、国土交通省総合政策局事業総括調整官室では、国土交通省の所管する建設工事における自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌の取り扱いに関し、参考となるマニュアルを策定するため、平成 20 年 10 月に「建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会」(委員長：嘉門 雅史 香川高等専門学校長)の設置を依頼し、「建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土砂への対応マニュアル(暫定版)」(以下、「マニュアル」という)をとりまとめていただいたところである。

第 171 回国会において、「土壌汚染対策法の一部を改正する法律」が成立し、平成 22 年 4 月 1 日施行予定であるが、環境省によれば、従来法では対象外とされていた「自然的原因により有害物質が含まれる土壌」について、改正法では対象になるとされている。従って、平成 22 年 4 月以降は、改正法の適用範囲や運用基準に留意した上で、本マニュアルを適用する必要がある。

今後、建設工事の実施に当たり、法や条例等の対象外の場合など、必要に応じ、マニュアルが活用されることを期待している。

目 次

はじめに

第1章 総説

1.1 マニュアルの目的	1
1.2 適用範囲	6
1.3 留意事項	7
1.4 用語の定義と解説	8

第2章 自然由来の重金属等による環境リスク

2.1 身近に存在する自然由来の重金属等	10
2.2 自然由来の重金属等の分布と溶出特性	14
2.3 重金属等の曝露経路と指定基準	19
2.4 建設工事における自然由来の重金属等の特色	20

第3章 建設工事における自然由来の重金属等への対応

3.1 法的枠組み	22
3.2 バックグラウンド値	24
3.3 対応の流れ	26

第4章 調査・試験方法

4.1 調査および試験の手順	29
4.2 重金属等の起源の識別	32
4.3 資料等調査	34
4.4 地質調査	37
4.5 水文調査	39
4.6 試料の採取	40
4.7 地質試料の調製	41
4.8 スクリーニング試験および岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験	43
4.8.1 スクリーニング試験および岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験の概要	43
4.8.2 全含有量試験	44
4.8.3 スクリーニング試験結果の評価	48
4.9 溶出試験	51
4.9.1 溶出試験の概要	51
4.9.2 短期溶出試験	52
4.9.3 酸性化可能性試験	54
4.9.4 実現象再現溶出試験	56
4.10 直接摂取のリスクを把握するための試験	61
4.11 リスク評価に必要な地盤特性を把握するための試験	62
4.11.1 発生源評価に必要な試験	62
4.11.2 周辺地盤評価に必要な試験	62
4.12 水質分析	63
4.13 迅速判定試験	64

第5章 リスク評価

5.1 対応の方針	67
-----------	----

5.2 サイト概念モデルに基づく対応	70
--------------------	----

第6章 対策

6.1 対策の選定・設計	74
6.2 対策の施工	83

第7章 モニタリング

7.1 モニタリングの目的	85
7.2 モニタリングの計画	86
7.3 モニタリング結果の利用と留意点	90

資料集

1. 土壌・地下水汚染に係る基準値	資料 1
2. 関係法令等	資料 3
2-1 土砂のたい積、埋立て等による土壌汚染の防止を図る条例等	資料 3
2-2 不溶化处理土壌の評価方法((社)土壌環境センター技術標準 抜粋)	資料 6
3. 岩石・土壌に含まれる重金属等の起源を識別する試験方法	資料 8
4. 各重金属等の基準値設定根拠	資料 12
5. 蛍光X線分析装置の定量下限値および検出限界	資料 15
6. 短期溶出量試験結果の補正方法	資料 16
7. 過酸化水素水を用いる促進酸化試験	資料 18
8. 硫化鉱物を含む岩石・土壌の溶出特性	資料 19
9. 実現象再現溶出試験方法の例	資料 22
10. 迅速判定試験の適用事例	資料 31
11. リスク評価手法の理論	資料 32
12. リスク計算例	資料 37
13. 特定有害物質の地盤(地下水を含む)内での挙動	資料 44
14. 酸性水への対応	資料 45
15. ケースヒストリー	資料 48

第1章 総説

1.1 マニュアルの目的

本マニュアルは、公共工事として実施される建設工事において、自然由来の重金属等を含有する岩石、土壌、あるいはそれらの混合物（以下、「岩石・土壌」という）に起因する人への健康への影響のおそれが新たに発生する場合の調査、設計、施工及びモニタリングにおける技術的な対応方法を示すものであり、その影響の防止を目的とする。

なお、従来法では対象外とされていた「自然的原因により有害物質が含まれる土壌」については、第171国会において成立した「土壌汚染対策法の一部を改正する法律」において、法の対象になるとされていることから、改正法の施行（平成22年4月1日）以降は、改正法の適用範囲や運用基準に留意した上で、マニュアルを適用する必要がある。

(1) 自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌による人の健康への影響のおそれが新たに発生する場合

建設工事の実施によって、自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌による人への健康への影響のおそれが新たに発生する場合とは、

- ・ 自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌を掘削する場合
- ・ 視線由来の重金属等を含有する岩石・土壌を盛立、埋立する場合

が挙げられる。なお、我が国における自然由来の重金属等の分布や存在形態については「2.2 自然由来の重金属等の分布」を参照されたい。

(2) 本マニュアルの位置づけ

重金属等による土壌・地下水汚染対策を取り扱う法令、マニュアル等の主要なものとして、「土壌汚染対策法」および「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（暫定版）¹⁾」がある。

土壌汚染対策法では、特定有害物質の製造、使用又は処理が行われた施設が廃止された場合等の土地を調査の対象としており、指定基準を超過する特定有害物質が専ら自然由来の可能性が高いと判断できる場合の土壌については、これまで（平成22年3月31日まで）は適用の対象外とされていた。（土壌汚染対策法の施行について（平成15年2月4日環水土第20号））。

平成22年4月1日以降、改正土壌汚染対策法が適用されるため、改正法に基づいた適切な対応が必要となる。法の内容について、不明な点は都道府県・政令市の環境部局に問い合わせることが望ましい。なお、岩石等はそもそも改正法の土壌含有量調査の対象とされていない。すなわち、環境省によると「土壌汚染対策法の一部を改正する法律による改正後の土壌汚染対策法の施行について（平成22年3月5日環境省水・大気環境局長通知）」で「測定の対象となる土壌は、破砕することなく、自然状態において2ミリメートル目のふるいを通させ得た土壌」としているので、留意されたい。

一方、「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（暫定版）」は、建設工事で遭遇する土壌汚染対策法の調査命令によらない事象を対象としている点で本マニュアルと共通点があり、自然由来の特定有害物質が指定基準超過して含まれている土壌の取り扱いを示している。

しかしながら、自然由来の重金属等はこれらの法令、マニュアル等において対応が明確にされていない固結した岩石や海成堆積物に含まれる場合が多く、人為由来による汚染とは異なり地表からの調査ではその性状、分布等が十分に把握できないことが多い。

そこで、本マニュアルは、関連の法令、マニュアル等を補完する形で自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌に対する技術的対応を包括的に示し、人の健康への影響の防止を図るものである。

【引用文献】

- 1) 独立行政法人 土木研究所（編）（2004）：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル（暫定版）．鹿島出版会，149p．

【参考：改正土壤汚染対策法】

ここでは、建設工事に大きな影響を及ぼす改正法の第4条、第14条、第7条について整理する。なお、ここで示す内容は平成22年2月末日時点で、環境省より情報提供されている内容をまとめたものであり、改正法の運用を全て記述しているものではないので、不明な点は関係部局への確認が必要である。

(1) 一定規模以上の土壤汚染のおそれがある土地の形質変更時における届出について

「改正法第4条において一定規模以上の土地の形質変更を実施する場合は、形質変更に着手する30日前までに都道府県知事に届け出ることとされている」。一定規模とは「土壤汚染対策法施行規則（平成22年環境省令第1号）」（以下、「省令」という）の第22条で3,000m²とされている。環境省によると、工区が分割されていても一つの工事と考えられる場合は工区を合わせて計算するとともに、資材置き場などがある場合はそれらの面積も合わせて形質変更の面積とする、としている。形質変更の面積は図1.2に示すように、盛土範囲と土地の掘削範囲を合わせた面積としている。

また、トンネル等の面積の算出の考え方については図1.3に示しているとおり、開口部を地上に投影した部分の面積の合計としている。（参考：図1.1 法第4条調査の流れ、図1.2 都道府県知事が土壤汚染のおそれがあると認めた土地の範囲例、図1.3 トンネル等の地下掘削の場合の調査対象例）

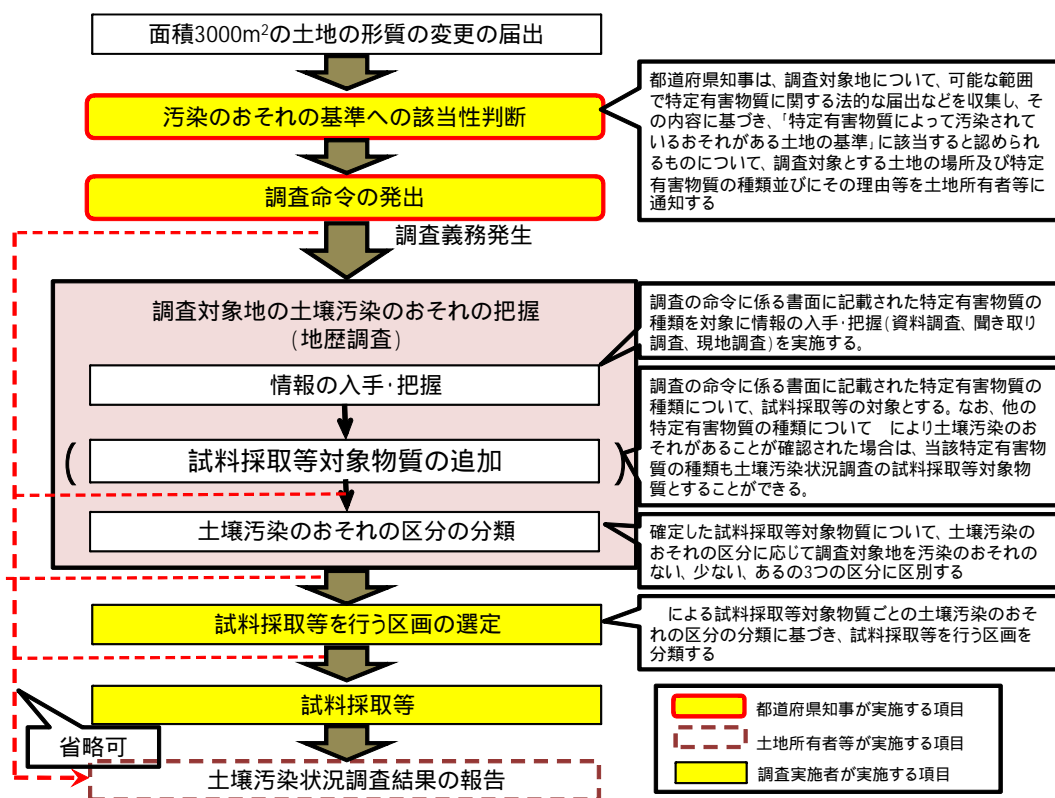


図 1.1 法第4条調査の流れ（環境省資料より）

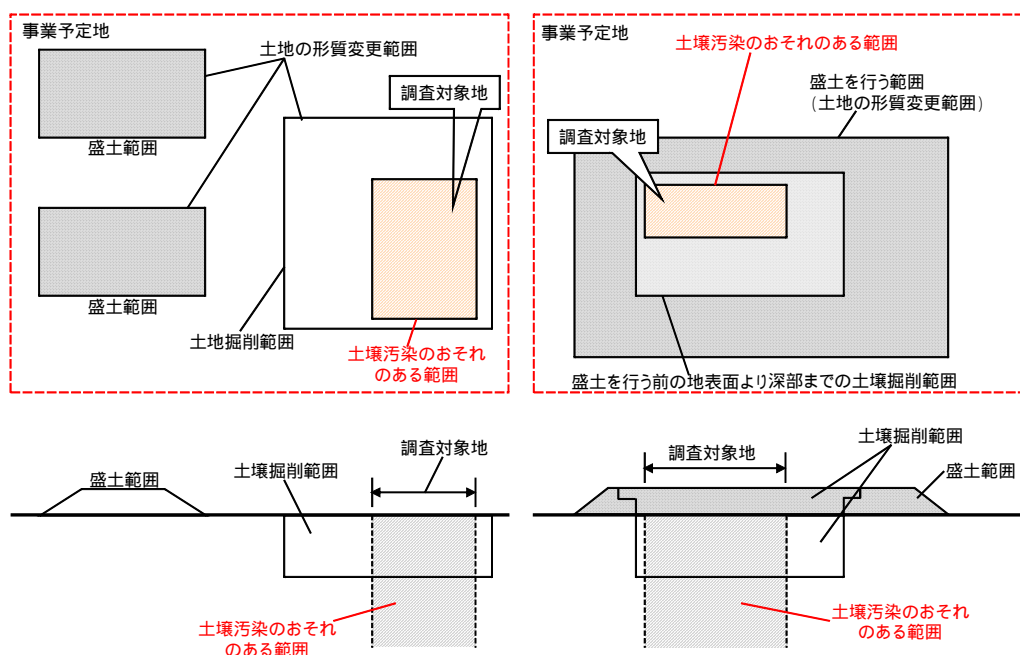


図 1.2 都道府県知事が土壌汚染のおそれがあると認めた土地の範囲例（環境省資料より）

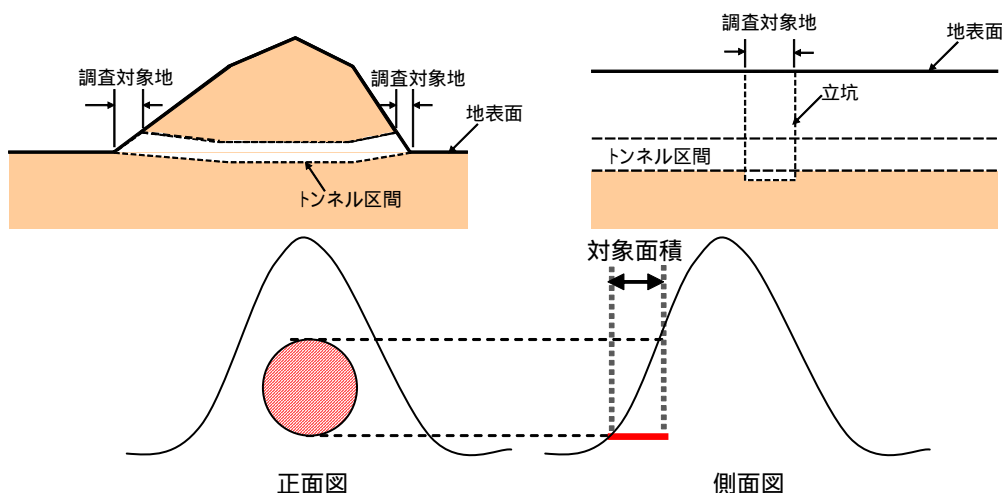


図 1.3 トンネル等の地下掘削の場合の調査対象例（環境省資料より）

(2) 法 4 条に基づく調査命令

届出を受けて都道府県知事は土壌汚染のおそれがあると判断した場合は法第 4 条第 2 項に基づき、土地の所有者等に対して特定有害物質による汚染の状況について調査させることができるとしている。調査命令は形質変更範囲全体に出されるのではなく、図 1.2 のとおり土壌汚染のおそれのある範囲にのみ出される。

土壌汚染のおそれの判断基準として省令第 26 条で以下の 5 項目が示されている。

土壌の特定有害物質による汚染状態が法第六条第一項第一号の環境省令で定める基準に適合しないことが明らかである土地であること。

特定有害物質又は特定有害物質を含む個体若しくは液体が埋められ、飛散し、流出し、又は地下に浸透した土地であること。

特定有害物質をその施設において製造し、使用し、又は処理する施設に係る工場又は事業場の敷地である土地又は敷地であった土地であること。

特定有害物質又は特定有害物質を含む個体若しくは液体をその施設において貯蔵し、又は保管する施設（特定有害物質を含む液体の地下への浸透の防止のための措置として環境大臣が定めるものが講じられている施設を除く。）に係る工場又は事業場の敷地である土地又は敷地であった土地であること。

前三号に掲げる土地と同等程度に土壌の特定有害物質による汚染状態が法第六条第一項第一号の環境省令で定める基準に適合しないおそれがある土地であること。

(3) 「自然的原因により有害物質が含まれる土壌」の取り扱いについて

自然的原因により有害物質が含まれる土壌については、従来、法の対象とはならないと「土壌汚染対策法の施行について（平成 15 年 2 月 4 日環水土第 20 号）」において示されていたが、改正法においては「汚染土壌の搬出及び運搬並びに処理に関する規制を創設したこと、かかる規制を及ぼす上で、健康被害の防止の観点からは自然的原因により有害物質が含まれる汚染された土壌をそれ以外の汚染された土壌と区別する理由がない」ことから自然的原因により有害物質が含まれる土壌も法の対象に含まれると環境省から聞いている。

(4) 要措置区域等への指定の申請制度について

土地の所有者が自主的に調査を行い、汚染が明らかになった場合は法第 14 条に基き、都道府県知事に対し、要措置区域等の規制対象区域に指定することを申請することができる。

申請する際に記載する事項および添付する書類として省令第 55 条及び第 56 条で以下のとおり示されている。

記載事項

- ・氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名
- ・申請に係る土地の所在地
- ・申請に係る調査における試料採取等対象物質
- ・申請に係る調査において土壌その他の試料の採取を行った地点及び年月日、当該試料の分析の結果並びに当該分析を行った計量法第百七条の登録を受けた者の氏名又は名称
- ・申請に係る調査を行った者の氏名又は名称

添付する書類

- ・申請に係る土地の周辺の地図
- ・申請に係る土地の場所を明らかにした図面
- ・申請者が申請に係る土地の所有者等であることを証する書類
- ・申請に係る土地に申請者以外の所有者がいる場合にあっては、これらの所有者等全員の当該申請することについての合意を得たことを証する書類

(5) 規制対象区域の分類等による講ずべき措置の内容について

調査命令に基づく調査又は自主調査の結果、汚染状態が基準に適合しない場合、都道府県知事により要措置区域等に指定される。汚染により人の健康に係る被害が生じ、又は生ずるおそれがある場合、都道府県知事は法第 6 条に基づいて「要措置区域」に指定するとされている。汚染されているが人の健康に係る被害が生ずるおそれがない場合、都道府県知事は法第 11 条に基づき「形質変更時要届出区域」に指定するとされている。

要措置区域に指定された区域では、土壌の特定有害物質による汚染による健康被害を防止するために必要な限度において、都道府県知事は法第 7 条第 3 項に基づき土地の所有者等に対して汚染の除去等の措置を講ずべきことを指示するとされている。都道府県知事から指示を受けた者は法第 7 条第 2 項に基づき都道府県知事から示された汚染の除去等の措置又はこれと同等以上の効果を有すると認められる汚染の除去等の措置を講じなければならないとされている。

汚染の除去等の措置及びこれと同等以上の効果を有すると認められる汚染の除去等の措置は省令別表 5 に定められている。

土壌汚染対策法施行規則（平成 21 年環境省令第 1 号）関係条文の抜粋

第二十二條 法第四条の環境省令で定める規模は、三千平方メートルとする。

第二十六條 法第四条第二項の環境省令で定める基準は、次のいずれかに該当することとする。

- 一 土壌の特定有害物質による汚染状態が法第六条第一項第一号の環境省令で定める基準に適合しないことが明らかな土地であること。
- 二 特定有害物質又は特定有害物質を含む個体若しくは液体が埋められ、飛散し、流出し、又は地下に浸透した土地であること。
- 三 特定有害物質をその施設において製造し、使用し、又は処理する施設に係る工場又は事業場の敷地である土地又は敷地であった土地であること。
- 四 特定有害物質又は特定優雅物質を含む個体若しくは液体をその施設において貯蔵し、又は保管する施設に係る工場又は事業場の敷地である土地又は敷地であった土地であること。

五 前三号に掲げる土地と同等程度に土壌の特定有害物質による汚染状態が法第六条第一項第一号の環境省令で定める基準に適合しないおそれがある土地であること。

第二十七条 法第四条第二項に規定する命令は、次に掲げる事項を記載した書面により行うものとする。

- 一 法第四条第二項に規定する調査の対象となる土地の場所及び特定有害物質の種類並びにその理由
- 二 法第四条第二項の規定による報告を行うべき期限

第三十五条 法第七条第二項の環境省令で定める事項は、汚染の除去等の措置を講ずべき土地の場所及び期限とする。

第三十六条 法第七条第三項の環境省令で定める汚染の除去等の措置は、別表五の上欄に掲げる土地の区分に応じ、それぞれ同表の下欄に定める汚染の除去等の措置とする。

第三十九条 別表五の上欄に掲げる土地において講ずべき汚染の除去等の措置は、それぞれ同表の中欄に定める汚染の除去等の措置とする。

第五十五条 法第十四条第二項の環境省令で定める事項は、次のとおりとする。

- 一 氏名又は名称及び住所並びに法人にあっては、その代表者の氏名
- 二 申請に係る土地の所在地
- 三 申請に係る調査における試料採取等対象物質
- 四 申請に係る調査において土壌その他の試料の採取を行った地点及び年月日、当該試料の分析の結果並びに当該分析を行った計量法第一百七条の登録を受けた者の氏名又は名称
- 五 申請に係る調査を行った者の氏名又は名称

第五十六条 法第十四条第二項の環境省令で定める書類は、次のとおりとする。

- 一 申請に係る土地の周辺の地図
- 二 申請に係る土地の場所を明らかにした図面
- 三 申請者が申請に係る土地の所有者等であることを証する書類
- 四 申請に係る土地に申請者以外の所有者がいる場合にあっては、これらの所有者等全員の当該申請することについての合意を得たことを証する書類

1.2 適用範囲

(1)対象物質

土壌の汚染に係る環境基準の対象物質のうち、自然由来で岩石・土壌中に存在する可能性のあるカドミウム（Cd）、六価クロム（Cr(VI)）、水銀（Hg）、セレン（Se）、鉛（Pb）、ヒ素（As）、フッ素（F）、ほう素（B）とする。

(2)適用可能な工事

港湾事業などの海域での工事を除く建設工事であり、かつ、土壌汚染対策法や条例等の対象外のものへの適用が可能である。

なお、土壌汚染対策法や条例等の対象であっても、土壌汚染対策法や条例等で定められた方法で実施したうえ、さらなる検討を行う際にも適用可能である。

(1) マニュアルで対象とする物質

本マニュアルでは、土壌の汚染に係る環境基準の対象物質のうち、自然由来で岩石・土壌中に存在する可能性のあるカドミウム（Cd）、六価クロム（Cr(VI)）、水銀（Hg）、セレン（Se）、鉛（Pb）、ヒ素（As）、フッ素（F）、ほう素（B）とする。

岩石・土壌にしばしば含まれる硫化鉱物の酸化によって酸性水が発生することがある。酸性水の発生に伴って重金属等の溶出量が増加する可能性があることから、酸性水の発生についても適切に対応する。

(2) 適用可能な工事

港湾事業などの海域での工事を除く建設工事であり、かつ、土壌汚染対策法や条例等の対象外のものに適用可能である。なお、土壌汚染対策法や条例等の対象であっても、土壌汚染対策法や条例で定められた方法で実施したうえ、さらなる検討を行う際にも適用可能である。港湾事業などの海域での工事は、土壌汚染対策法の他に海洋汚染等及び海上災害の防止に関する法律に基づいた調査・対策が必要となるため、適用対象外とする。

1.3 留意事項

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌は、人為由来の汚染土壌とはその物理・化学的特性が異なることに留意する。また、本マニュアルに記載している技術的な対応方法は、規格として定めるものではなく、本マニュアル以外の方法の採用を妨げるものではない。

(1) 人為由来の汚染土壌と本マニュアルで扱う岩石・土壌の相違

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌は、その物理・化学的特性が人為由来の汚染土壌とは異なる場合があるので、それらを考慮した調査・試験・評価・対策の検討が必要である。主な相違点を以下に挙げる。

- 1) 酸性化による重金属等の溶出特性への影響：岩石・土壌にはしばしば黄鉄鉱等の硫化鉱物が含まれ、掘削等によって空気・雨水に曝露されると硫化鉱物の酸化分解反応によって酸性化が生じる。この鉱物の分解反応によって鉱物中に微量存在する重金属等が溶出したり、酸性化に伴い重金属等の溶出が促進される場合がある。
- 2) 重金属等の汚染分布や存在形態：自然由来の重金属等は地質の影響を受けて広い範囲に分布するのに対して、人為由来の汚染物質の分布は、汚染物質の埋立、漏洩箇所等を中心に局所的に高濃度の箇所が存在する。
また、自然由来の重金属等は元来鉱物中に含まれているものであるが、こうした鉱物が分解してしまった場合には、他の鉱物表面に吸着されていたり、土壌間隙水に含まれる場合がある。一方、人為由来の重金属等は人工化合物として土壌に埋設されたり、廃液として土壌に流され、土壌間隙水に含まれたり、鉱物表面に吸着されているが、のいずれの場合にも、時間が経過すると化学反応を起こし、天然鉱物とは異なる化学組成を有する物質として固定される場合がある。
- 3) 粒径：土壌汚染対策法に基づく溶出試験では2mmふるいを通したものを試料とするが、建設工事で発生する岩石・土壌は2mmより大きい粒径の粒子を含む。特に岩石に対しては溶出試験に供する試料の粒径調整方法が確立されていない。

本マニュアルでは上記の問題に対して、次のような方針で対処するものである。

従前より便宜的に実施されている環境省告示第18号に準ずる試験（短期溶出試験）で把握ができない、酸性化に伴う重金属等の溶出の促進について、過酸化水素水を用いるpH試験方法に準じた試験（酸性化可能性試験）や実際の現場における溶出条件を踏まえた溶出試験（実現象再現溶出試験）を用意し、長期的に溶出量が増大する可能性のある岩石・土壌を適切に把握できるようにした。

地質学的な手法に基づき、自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌の分布を把握する合理的な調査方法を提案した。また、自然由来の重金属等の存在状態を踏まえた試験方法を提案した。

短期溶出試験においては、試料粒径を2mm以下になるように粉碎調整することになっているが、実現象再現溶出試験として、実粒径を考慮した試験の選択ができることとした。

(2) 本マニュアルの利用上の留意点

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌に起因する影響は複雑な機構を有しており、機構の解明や調査・試験・評価・対策方法の確立については今後の研究に期待される部分が多い。したがって、本マニュアルは現時点の知見に基づいて人の健康への影響を防止するための技術的対応方法を整理したものであり、今後も最新の知見を随時反映していく予定である。よって、マニュアルに記載された調査・試験・評価・対策方法以外の方法の採用を妨げるものではなく、実務においては現場状況等を総合的に勘案して適切に対応されたい。

1.4 用語の定義と解説

本マニュアルでは、以下のように用語を定義する。	
一体区域	同一の自然的原因により重金属等が存在し、かつ岩石・土壌の含有量バックグラウンド値が同程度の区域。
移流分散解析	地下水中の重金属等の移動を求めるための解析手法。地下水の流れにのって移動する移流現象とその濃度勾配による分散現象について、移流分散方程式によって計算する。
岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験	スクリーニング試験と同じ。
検出限界	分析において、検出できる限界の値。
工事実施（予定）区域	岩石・土壌の掘削等を伴う工事箇所（その予定箇所）。
サイト概念モデル	自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌（発生源）、発生源から敷地境界や保全対象区域までの距離・曝露経路（周辺状況）、周辺地盤の重金属等の吸着特性・地下水の流れ（周辺地盤）などの現場毎の特性を考慮し、環境への影響を評価するためのモデルを指す。サイト概念モデルを構築することにより、現場状況に適した合理的な対策の立案が可能となる。
酸性水	pH が 5.8 を下回る地下水または表流水。
敷地境界	工事実施区域や対策実施区域とその周辺の土地との境界。
自然由来	人為的影響を受けていない岩石・未固結堆積物・土砂の元来的な性質、条件に由来すること。
実現現象再現溶出試験	岩石・土壌の現場条件下における重金属等の溶出挙動を予測、評価するための試験。
指定基準	土壤汚染対策法に規定されている土壤溶出量基準および土壤含有量基準。
重金属等	カドミウム(Cd)、鉛(Pb)、六価クロム(Cr(Ⅵ))、水銀(Hg)、ヒ素(As)、セレン(Se)、フッ素(F)、ほう素(B)およびそれらの化合物。
迅速判定試験	施工中に掘削した岩石・土壌を対策が必要なものと不要なものに迅速に分別するための試験。
スクリーニング試験	対象とする地質が、以後、溶出試験、リスク評価等を実施する必要があるかを判定することを目的とし、地質試料を対象に自然由来の重金属等の全含有量を調査する試験。岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験と同じ。
全含有量	蛍光 X 線分析、昭和 63 年 9 月環水管第 127 号（底質調査方法）等の方法による岩石・土砂が含有する対象物質の全量。
専門家による総合評価	溶出試験結果に加えて対象となる岩石・土壌の特性を考慮し、自然由来の重金属等に関する更なる試験の実施や対策の必要性の有無を判断すること。
第二溶出量基準	土壤汚染対策法に規定される基準の一つ。第二溶出量基準を超過する場合、遮断型処分場への搬入などより高度な対策が求められる。なお、重金属等（水銀を除く）については、土壤溶出量基準の 30 倍が第二溶出量基準として設定されている。
定量下限値	分析において、定量性を確保できる下限の値。
土壤環境基準	土壤中の重金属等の濃度に関して定められた環境基準を指す。
土壤含有量	平成 15 年 3 月環境省告示第 19 号に基づく試験による対象物質の含有量。一般に mg/kg で表す。人間の胃の中で溶解する量を想定した量である。
土壤含有量基準	土壤汚染対策法に規定される指定区域の指定に係る基準のうち、土壤に含まれる特定有害物質の量に関するもの。土壤中の全含有量より小さい値となる。
土壤溶出量	平成 15 年 3 月環境省告示第 18 号に基づく試験による対象物質の溶出量。一般に mg/L で表す。
土壤溶出量基準	土壤汚染対策法に規定される指定区域の指定に係る基準のうち、土壤に水を加えた場合に溶出する特定有害物質の量に関するもの。
対策実施（予定）区域	人の健康への影響のおそれがある自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌を対象に対策を行う箇所（その予定箇所）。
対象地域	工事実施（予定）区域、対策実施（予定）区域および保全対象（予定）区域。
地下水環境基準	地下水中の重金属等の濃度に関して定められた環境基準を指す。
地質（調査）	地盤を構成する岩石・土壌の種類と分布、およびその性質（それらの調査）。
地質試料	岩石・土壌の固体からなる物質で各種試験に供するための試料。
土地の形質変更	土地の掘削等により形質を変更すること。
曝露（経路）	自然由来の重金属等が人の体内に取り込まれること（取り込まれる経路）。
曝露試験（曝露水量）	岩石・土壌を環境中に曝す試験（曝露試験において試料が曝される雨量、水量）。
発生源	掘削された自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌。

バックグラウンド値	対象地域において地下水・表流水、または岩石・土壌に平均的に含まれる自然由来の重金属等の濃度、または溶出量・全含有量。
標準試料	分析において、分析値が明らかな試料。
不圧地下水	被圧されていない地下水。その地下水面は大気圧と等しい圧力を持つ。
保全対象（予定）区域	自然由来の重金属等による人の健康への影響を防止すべき箇所（その予定箇所）。
溶出量（濃度）	溶出試験において溶液中に溶解した対象物質の量（濃度）。
リスク評価	構築したサイト概念モデルをもとに、自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌の人の健康への影響を評価すること。例えば地下水等経由の曝露では、移流分散解析等を実施して、敷地境界および保全対象近傍における将来の自然由来等の重金属等の濃度を予測する。

第2章 自然由来の重金属等による環境リスク

2.1 身近に存在する自然由来の重金属等

自然由来の重金属等は、海水（ふっ素、ほう素等）、温泉水（鉛やひ素等）、お茶（ふっ素）等に含まれ、古来より我々の生活の身近に存在し、共存してきたものである。

カドミウム、クロム、水銀、セレン、鉛、ひ素、ふっ素、ほう素は人間の生活に不可欠な元素であり、主に地球表層を構成する地殻から採取され、工業的に加工され活用されている。鉄、銅などの主要な金属元素のように身近に接する元素ではないが、加工品の添加物として用いられ、それらの性能向上に欠かせない元素である。我々の健康を維持する上でもひ素、ふっ素、セレンなどは微量ながら必須元素として位置づけられている。

地殻を構成する岩石・土壌にもこれらの元素は含まれる（表 2.1.1）。ここでは、これらの重金属等の地殻での含有状況、基本的な性質、食品など身近な物質における全含有量、人体への影響、産業における利用について概説する。

表 2.1.1 自然界における主な重金属等の存在度（単位：mg/kg）

	亜鉛	カドミウム	クロム	水銀	セレン	銅	鉛	ひ素	ふっ素	ほう素
地殻の平均値（クラーク数） ¹⁾	70	0.2	100	0.08	0.05	55	13	1.8	625	10
大陸地殻の元素量 ²⁾	80	0.098	185	0.08	0.05	75	8	1	625	10
日本列島の上部地殻の平均値 ³⁾	74.1	-	84	-	-	25	16.9	6.5-7.1	-	-
日本の河川堆積物の平均値 ⁴⁾	118	0.158	65.2	0.054	-	30.6	23.1	9.32	-	-

(1) ひ素（As）

ひ素は、地殻中に広く分布する元素で、地殻の全含有量平均値としては 1～9.32 mg/kg 程度とされている。地殻中では銅・鉛・鉄などの金属と一緒に三価で存在することが多く、表層の土壌や水中では酸化され五価の状態で存在することが多い。三価のひ素は毒性が強く、亜ひ酸（ As_2O_3 ）による中毒事件がよく知られている。硫化物に随伴してひ素が存在することが多く、ひ素は硫ひ鉄鉱（ FeAsS ）などとして産出する。硫化物に含まれるひ素は、硫化物の酸化とともに亜ひ酸やひ酸として水中に溶解する。酸化鉄-水酸化鉄のコロイドや有機物に吸着しやすく、岩石・土壌の粒子表面に二次的に存在する。このような存在状態では pH や酸化-還元状態の変化で周辺の水へ溶出しやすい。地下水中に溶存し日本でもしばしば環境基準値（0.01mg/L）を超過する事例がある。バングラデシュ、インド、中国、内モンゴルなどではひ素を含む地下水を飲用し、大規模な健康被害が生じていることは著名である。地殻中でのひ素の分布は火山作用、熱水作用を受けた地帯で比較的濃度が高く存在するほか、海域で堆積した細粒堆積岩（泥岩など）にも一般的に含まれている。石炭中にも含まれ、石炭燃焼で大気中に放出される。温泉水にはひ素濃度が高い場合がある（岡山県奥津温泉:2.8mg/L；北海道北湯沢温泉:1.8mg/L；北海道定山渓温泉:3mg/L など）。

環境中に微量ではあるが一般的に存在するため、生物もまたひ素を保有している。海水中には約 0.002 mg/L のひ素が含まれ、藻類やプランクトンは無機ひ素を取り込み、毒性の低いメチル化された有機態として蓄積しやすい。例としてヒジキは数 10mg/kg のひ素を含んでいる。海洋生物中のひ素全含有量は陸上生物に比べ高い傾向にある。慢性影響としては、皮膚や肝臓の異常、末梢血管障害、末梢神経障害、皮膚がん、肺がんなどが報告されている。

工業用途では、ひ素は半導体の原料、木材の防腐・防蟻剤、触媒、脱硫剤、ガラス添加剤などに使用されている。

(2) 鉛（Pb）

鉛は銅や金に次いで古くから人類が利用した金属の一つで、地殻の全含有量平均値として 8～23.1mg/kg 程度、火成岩・堆積岩とも 10～20mg/kg 程度含有する。土壌中では酸性土壌よりアルカリ土壌中で全含有量が高い傾向がある。鉛は空気中で酸化されやすく無機化合物では二価塩として存在する場合が多く、一部に四価塩となって存在する。水環境中では海水（0.08～0.4μg/L）より河川水・湖水（1～10 μg/L）で濃度が高い傾向があり、地下水・温泉

水ではこれらを上回る濃度を有することがある。土壌中では、粒子表面へ吸着するほか、鉛化合物が固体粒子や土壌中の有機物と有機金属錯体やキレートを生成するといった形態で存在する。銅、亜鉛、すずなどの金属鉱床に共に高濃度で含有されている。肺や経口により吸収された鉛化合物は種々の臓器に蓄積され、特に骨に固定されることが多く、また貧血、消化器不全、神経・腎障害をもたらす。

工業用途では、金属鉛は鉛蓄電池、散弾、鉛管、放射線遮蔽材、活字、ハンダに、鉛化合物は顔料塗料、ゴム塩化ビニル添加剤、農薬などに広く用いられる。

(3) ふっ素 (F)

最も軽いハロゲン元素で、空気、海水、地下水、土壌中などに存在し、海洋の魚介類・海藻などに存在する。地殻内の平均濃度は 625mg/kg 程度とされ、一般的に蛍石 (CaF_2)、水晶石 (Na_3AlF_6) やふっ素磷灰石 ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) などの鉱物として存在することが多い。また、黒雲母中に随伴して含まれることもある。海水中に含まれ 1.3mg/L 程度のふっ素濃度を示す。カルシウムイオンの少ないアルカリ性の地下水中で溶存しやすい傾向にある。これに対して河川水、湖水では、ほとんどが 0.1mg/L 以下であることが多い。海域で堆積した泥質岩などにもよく含まれるほか、熱水の影響を受けた地域の岩石にも含まれることがある。

海水中に含まれることから海産の魚介類、海藻 (2 ~ 10mg/kg 程度) に多く含まれ、シバエビ・メザシ (20 ~ 50mg/kg) 等で高い値を示す。茶葉 (緑茶・紅茶とも) は 200 ~ 500mg/kg (乾燥状態) の高い濃度を示すが、飲用で抽出されたお茶ではその濃度が低く、0.2 ~ 0.7mg/L 程度である。

適量のふっ素摂取は虫歯予防の効果があるとされ、欧米では水道水にふっ素添加を行っている国もある。0.9 ~ 1.2 mg/L の濃度の飲用水を継続して摂取すると 12 ~ 46% の割合で軽度の斑状歯が発生するとされ、1.4 mg/L 以上で、骨へのふっ素沈着の発生率や骨折リスクが増加するとされる。ふっ素は甲状腺、動脈、腎臓などでは高濃度化し、尿から排泄される。骨や歯に吸収されたふっ素はほぼ固定される傾向にある。

ふっ素は、虫歯予防表面処理剤、ふっ素樹脂原料、ガラスの表面加工、金属表面処理、代替フロン原料などで工業的に利用されている。近年、燐肥料に混在して環境中に増加する傾向がある。

(4) ほう素 (B)

地殻中の平均全含有量は 10mg/kg、海水中には 4.5mg/L 程度含まれており、植物および動物の必須元素である。海水中に一般的に含まれるため、海域で形成された細粒堆積物中に多く含まれ、海成泥岩では 100mg/kg 程度を含むことがある。ほう素は pH7.5 ~ 9.0 で堆積粒子などへ吸着されやすく、土壌堆積物に吸着して存在することが多い。環境中での移動は、海水の蒸発・火山作用で大気中に放出されるほか、海成泥質岩の風化から土壌・水域への移動などが生じる。人体への影響として中枢神経障害、腸障害、皮膚紅疹などが生じる。工業的には、鉄合金等の硬度増加剤、原子炉中性子吸収剤、ガラスや陶器への添加、金属表面処理、電気機器、印刷材料等で使用される。

(5) 水銀 (Hg)

水銀の地殻中の平均全含有量は 0.054 ~ 0.08mg/kg 程度である。火山、金属鉱床周辺の熱水脈に介在することが多く、岩石中では硫化物の辰砂 (HgS) あるいは自然水銀 (Hg) として存在する。国産重油・石炭の水銀全含有量はそれぞれ 0.015 ~ 0.046 mg/kg、0.65 ~ 0.74 mg/kg 程度含まれるとされている。水銀は常温で液体として存在する。空気中へ蒸発し、20 °C での空気中飽和濃度は約 15mg/m³ を示す。この濃度は、労働安全衛生法における作業環境測定基準および作業環境評価基準の基準値の 300 倍にもあたる濃度である。湖水、海水中で生物作用によって有機化し、メチル水銀 (アルキル水銀の一種) に変換される。メチル水銀の水に対する可溶性は非常に高い。このため食物連鎖を通じて、大型魚類や海生哺乳類に蓄積され、マグロ、キンメダイ、クジラなどに比較的高い濃度で含まれている。無機水銀の蒸気曝露で最も感受性の高い器官は中枢神経系であり、腎臓障害なども生じる。有機水銀は無機水銀に比べ毒性が非常に強い。水俣病は、アセトアルデヒド製造工程で副次的に生成されたメチル水銀が排水を介して環境中に排出されたことにより神経系障害が生じた著名な公害病である。工業的には、各種電極、金・銀などの抽出剤、各種計器 (温度計、気圧計、血圧計、整流器)、水銀灯、歯科用アマルガムなどで活用される。

(6) カドミウム (Cd)

地殻中の平均全含有量は 0.098 ~ 0.2mg/kg 程度と比較的少ない元素であるが、鉱物中や土壌中などに天然に存在する重金属で、亜鉛、銀、銅などの金属とともに存在する。海成堆積物でカドミウム濃度が高い傾向があり、特に海成堆積物中のリン酸塩には 15mg/kg 程度のカドミウムが含まれることがある。亜鉛、水銀と同族元素で、亜鉛とよく似た化学的挙動を示す。硫化物、炭酸塩、酸化物のカドミウム塩類は、水に溶解しにくく、硫酸塩、硝酸塩とハロゲン化物としてのカドミウム化合物は水溶性の高い塩類である。歴史的に鉱山開発、精錬などによって環境中

へ排出されてきた元素である。日本産の米（玄米）のカドミウム平均濃度は 0.06mg/kg 程度（CODEX 基準値*は精米で 0.4 mg/kg）であるが、金属鉱山周辺では水田などの土壌に蓄積し、平均値より高い濃度を示すことがある。人体への影響としては、長期の濃度の高い摂取で腎機能障害、骨の軟化が発生する。富山県神通川流域で発生したイタイタイ病は、神岡鉱山からの排水に含まれていたカドミウムが農業用水路に混入し、水田土壌を汚染し、米・野菜に蓄積した食物や汚染水を摂取したことによって発症したものである。カドミウムは水生生物に対する毒性が比較的高いとされている。工業的活用は電気メッキに從來使用されてきたが、近年では充電式電池や電子的用途で活用されている。

(7) セレン（Se）

地殻中の平均全含有量は、0.05mg/kg 程度である。砂岩、石灰岩、リン灰岩などの堆積岩で 1～100mg/kg と高い全含有量を示すものがある。石炭中にもセレンが高濃度で含まれるものがある。火成岩・変成岩では一般に低い全含有量を示す場合が多い。硫黄、硫化物中に少量含まれて産出され、化学的性質も硫黄に類似する。水中ではセレン酸・亜セレン酸として存在する。硫黄と同族であり、化学的にも同様な性質を示す。セレンは藻類、魚介類、肉類、卵黄に豊富に含まれる。特に海産の魚介類には 1～2mg/kg 程度含まれる場合がある。環境中へは、鉱業的に銅、鉛、亜鉛、リン酸塩、ウランなどの精製過程で排出されるほか、石炭燃焼の過程でも放出されやすい。リン肥料、農薬に介在して耕作土中に含まれる場合もある。人体には約 0.17mg/kg(体重)程度含まれるとされ、必須元素のひとつとされるが、過剰摂取による皮膚の障害、末梢神経障害、胃腸障害などが生じる。工業的には光電池、照度計、整流器など電子工業で活用されている。

(8) クロム（Cr）

地殻中の平均全含有量は、65.2～185mg/kg 程度である。花崗岩中では 2～60mg/kg 程度含まれる。最も高濃度で含まれるのは超塩基性岩や蛇紋岩などで、1000mg/kg を上回る全含有量を示すものもある。その他、土壌・火山灰や火山性ガス中に含まれる。クロムはマイナス二価からプラス六価の範囲の酸化状態を有する金属元素である。最も主要な含有鉱物としてはクロム鉄鉱がある。自然由来のクロムはほとんど三価の状態が存在する。19 世紀初め頃から、

クロムを六価態へ酸化させることによって工業的な使用が始まって以降、六価クロムが環境中に排出されるようになった。つまり、六価クロムによる汚染は人為由来であることが多い。火成岩のクロム全含有量はマグネシウムやニッケルの全含有量と相関が高い。リン鉱石を含む堆積岩中にクロムが含有されることも多く、リン酸塩肥料が使用される耕作土中にはクロム全含有量が高い場合がある。人体にとって三価クロムはインシュリンの作用を促進する必須元素とされている。六価クロムは発がん性があるとされ、呼吸器・消化器系障害や腎臓障害を生じる。工業的には六価クロム化合物がクロムメッキ、塗料、皮革なめし剤、触媒などに活用されている。セメントには六価クロムが製造工程の中で生成し、その中に含有するが、固化時の水和反応が十分に起こると溶出しにくい。

*CODEX 基準値: 国際食品規格（コーデックス規格）による基準値。FAO（国連食糧農業機関）および WHO（世界保健機関）により設置された、コーデックス委員会で策定。

【引用文献】

- 1) Mason, B.(1966): Principles of Geochemistry, 3rd ed., Wiley, 329p.
- 2) 地学団体研究会編(1996): 新版地学事典・平凡社。
- 3) Togashi, S., Imai, N., Okuyama-Kusunose, Y., Tanaka, T., Okai, T., Koma, T. and Murata, Y. (2000): Young upper crustal chemical composition of orogenic Japan Arc. Geochemistry Geophysics and Geosystem, 1, Paper No. 2000GC000083.
- 4) 今井登ほか(2004): 日本の地球化学図・産業技術総合研究所地質調査総合センター, 209p。

【参考文献】

土木研究所・応用地質・大成建設・三信建設工業・住鉱コンサルタント・日本工営 (2007): 建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル(暫定版)・土木研究所共同研究報告書第 358 号, 91p。
化学物質評価研究機構(2001): 化学物質ハザードデータ集評価シートリスト。
http://www.cerij.or.jp/db/date_sheet_list/list_sideindex_cot.html。
国土交通省セメント系固化処理土検討委員会(2003): セメント系固化処理土に関する検討最終報告書・38p。
湊 秀雄・日本地質学会環境地質研究委員会(1998): 砒素をめぐる環境問題・東海大学出版会, 201p。
産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センター(2006-2008): 詳細リスク評価書「鉛」・「カドミウム」・「六価クロム」。<http://unit.aist.go.jp/riss/crm/mainmenu/1.html>, 丸善, 282p, 369p, 290p。

The International Programme on Chemical Safety (1976-2001): Environmental Health Criteria Monographs, Chemical Safety Information from Intergovernmental Organizations, <http://www.inchem.org/pages/ehc.html>.

2.2 自然由来の重金属等の分布と溶出特性

岩石・土壌に含まれる自然由来の重金属等は、一般に人為由来の汚染と比較して、広範囲かつ低濃度に分布する傾向がある。しかし、火山作用・堆積作用など自然環境に影響を受けて濃集する地域がある。日本の国土は、環太平洋変動帯に位置しており、火山活動や地殻変動の活発な地帯である。このため、金属鉱山地域・火山地帯や特定の地質体などで周辺に比べて高い濃度で偏在する状況がある。

また、地質体に含まれる硫化鉱物の酸化に伴い、重金属等の溶出が増大することがある。

図 2.2.1、図 2.2.2 に産業技術総合研究所によって作成された有害元素を含む全国元素分布（「日本の地球化学図」¹⁾）データベースを基にして作成した各元素の濃度分布を示す。図 2.2.3 に重金属等を産出した記録のある鉱山の分布²⁾を示す。前節で身近に存在する自然由来の重金属等の一般的な性質や含有状況等を概説した。本節では、日本における自然地層や岩石中の重金属等の分布状況について概説する。

(1) ひ素 (As)

ひ素は、鉱脈鉱床や黒鉱鉱床などの熱水性の金属鉱床に高い濃度で含まれ、これまでもその採鉱・精錬の過程で環境中に拡散し、問題となってきた。

図 2.2.2 に示す河川堆積物のひ素全含有量で高濃度を示す地域は、このような金属鉱山（図 2.2.3）が存在する箇所の河川流域である。高濃度地域は、このような特異な個所に限られ、ほとんどの試料の全含有量は、10mg/kg を下回る。図 2.2.1 に示す全含有量の頻度分布をみると、数 mg/kg に最頻値があり、環境省が示す「自然的原因による含有量の上限値の目安」39mg/kg を下回るものがほとんどである。ひ素を含む地層・岩石は、極端に高濃度を示さないが、海成泥質岩をはじめとする堆積岩に一般的に含まれる。海成泥岩中には黄鉄鉱（パイライト）をはじめとする硫化物が含まれ、その中にひ素が随伴して含まれる。これらが風化過程の中で酸化され、地下水などへ溶出しやすくなる。酸化を受けた岩石などでは、ひ素は酸化鉄・水酸化鉄、粘土鉱物、有機物などに吸着されて存在し、酸化・還元状態や pH の変化によって溶出しやすくなる。このようにひ素全含有量のそれほど高くない一般的な堆積岩でも土壌溶出量基準を上回って溶出する場合が多数みられる。海岸平野下の沖積層や洪積層においても自然由来のひ素が土壌溶出量基準を上回る。図 2.2.4 に大阪平野の沖積層での事例³⁾を示す。沖積層中のひ素全含有量は 10mg/kg 程度までがほとんどである。一方、沖積粘土層の上端部で土壌溶出量が大きくなる傾向がみられるものの、土壌溶出量基準の 10 倍を超えることはほとんどない。

(2) 鉛 (Pb)・カドミウム (Cd)

鉛・カドミウムもひ素と類似して金属鉱床に高い

濃度で含まれる。鉛・カドミウムは銅、亜鉛、スズなどの金属鉱床に共在する。これらを産する鉱山は国内のほぼ全域に分布していて、グリーンタフが分布する地域（黒鉱鉱床）、三波川変成岩類の分布地域（特にキースラーガー鉱床）、鉱脈型の熱水鉱床、堆積岩が火成岩によって熱変成を受けてできたスカルン鉱床がその採掘対象である。このような金属鉱山地域で極めて高い全含有量を示すが、鉛の河川堆積物の元素全含有量の分布でみると、その全含有量は、一般的に 50mg/kg を下回る。図 2.2.1 に示す全含有量の頻度分布をみると、20mg/kg 前後に最頻値があり、環境省が示す「自然的原因による含有量の上限値の目安」140mg/kg

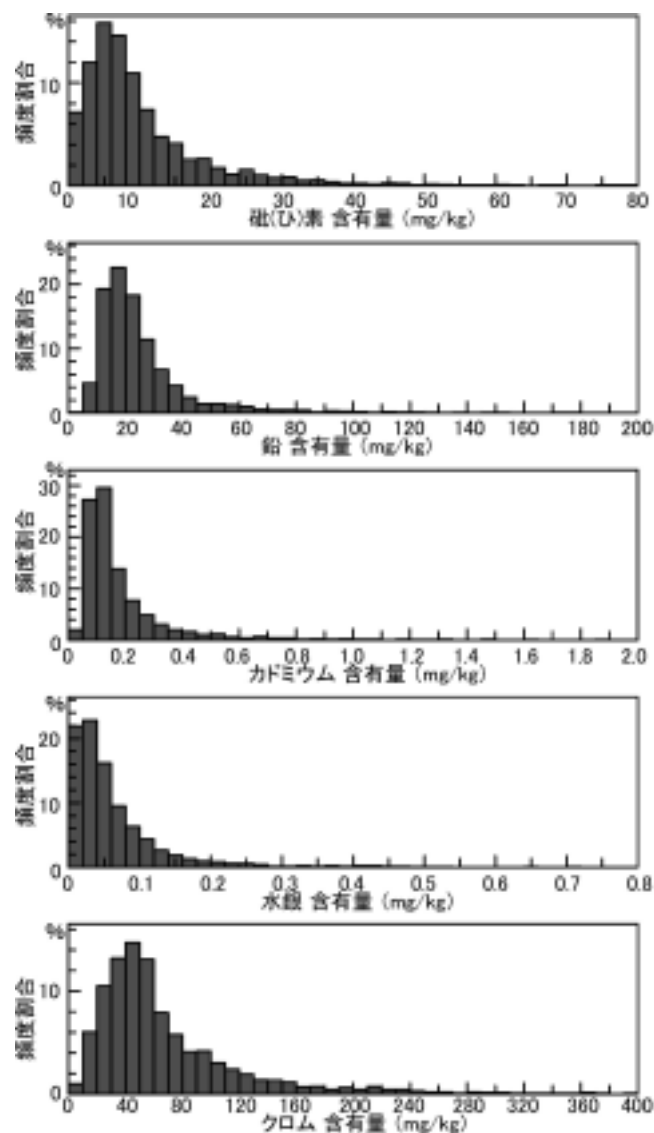


図 2.2.1 日本の河川堆積物における重金属等の濃度分布（今井ほか¹⁾より作成）

ここでいう含有量は、概ね本マニュアルの全含有量に相当する。

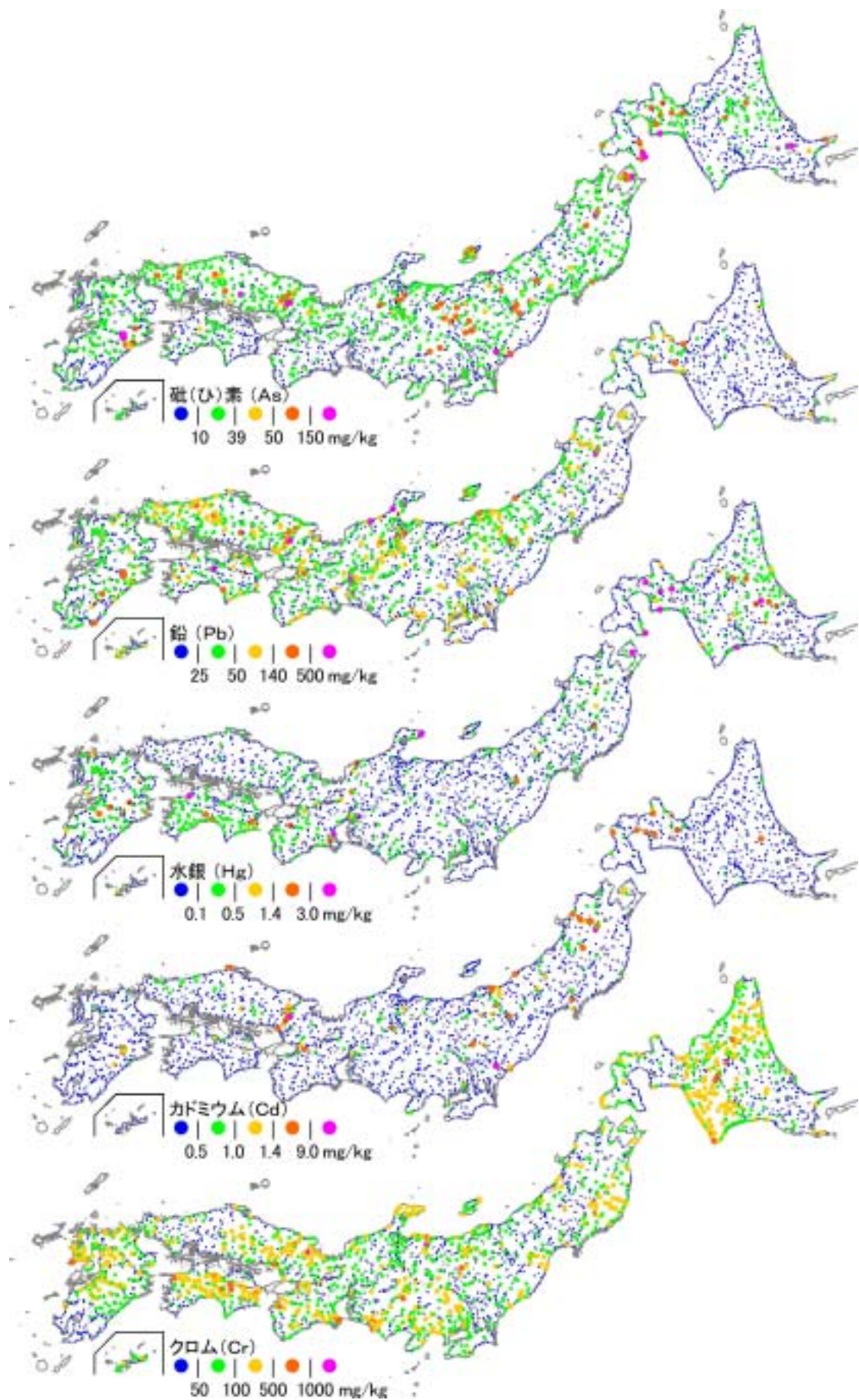


図 2.2.2 日本の河川堆積物の重金属等の含有量の分布
 (今井ほか¹⁾より作成)
 ここでいう含有量は、概ね本マニュアルの全含有量に相当する。

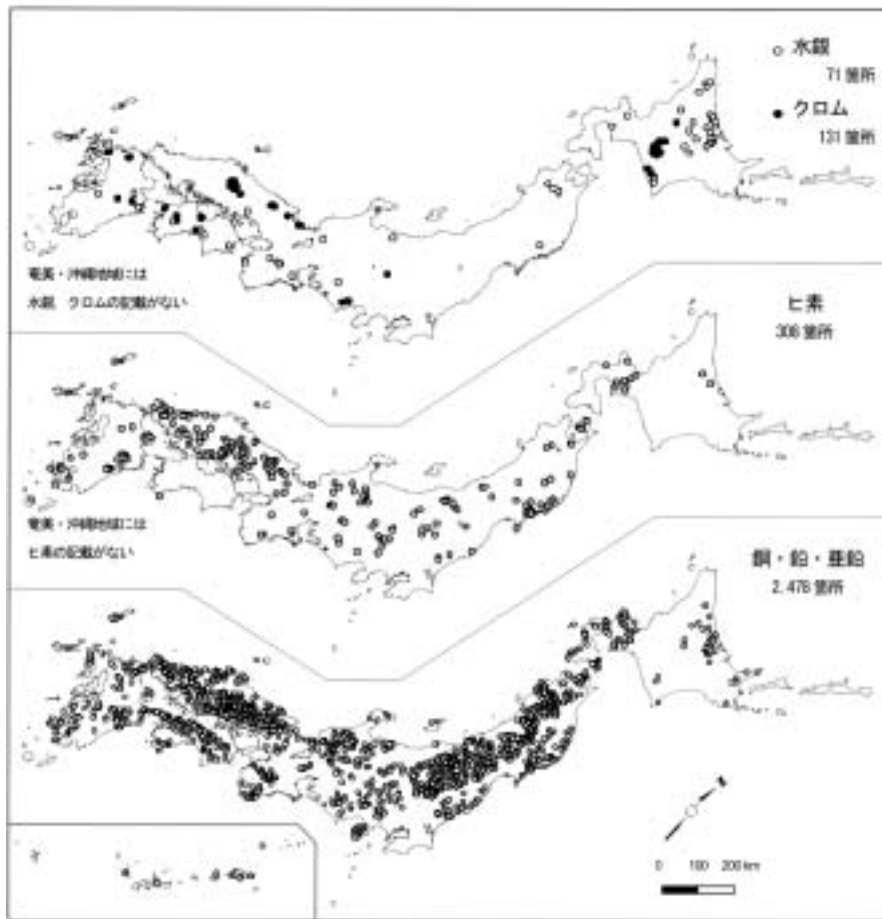


図 2.2.3 重金属等を産出した記録のある鉱山の分布²⁾

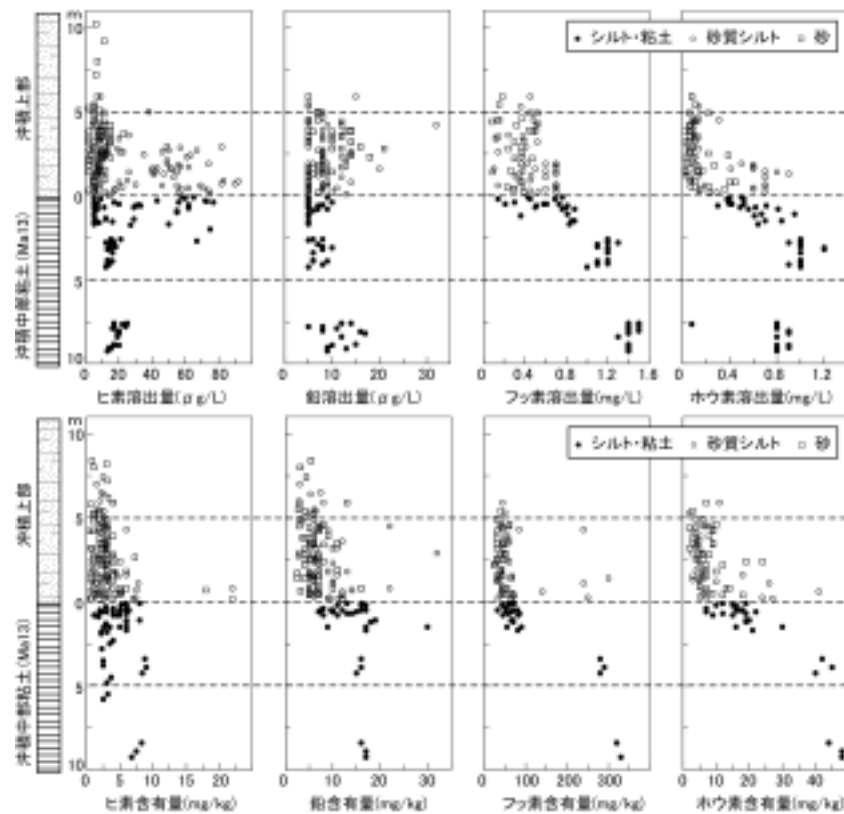


図 2.2.4 大阪平野主要部（大阪市区）沖積層のひ素・鉛・水銀・カドミウムの溶出量・含有量の分布傾向³⁾
大阪市内 6 地域の深度方向調査 61 孔の分析結果をまとめた。盛土での分析結果は除いてある。溶出量は土壌溶出量試験結果、含有量は底質調査方法による全含有量試験結果を示す。沖積中部粘土上限を基準として深度調整をしている。

を下回るものがほとんどである。カドミウムも 0.5mg/kg を下回り、その最頻値は 0.1mg/kg 程度で、「自然的原因による含有量の上限値の目安」1.4mg/kg を下回る。鉛の場合は、一般的な堆積岩にも低濃度で含有しているが、しばしば土壌溶出量基準を上回る。平野部に分布する沖積層をはじめとする第四紀堆積層でも土壌溶出量基準を数倍程度超過することがある（図 2.2.4）。

(3) ふっ素（F）・ほう素（B）

ふっ素・ほう素はいずれも海水中に一般的に含まれる元素である。このため、海域で形成された地層中に含まれることが多い。特に海成細粒堆積岩に含有することが多いが、土壌含有量基準を超過することはほとんどない。図 2.2.4 に示す大阪平野沖積層の事例³⁾でも、海成粘土層である沖積中部粘土(Ma13)で全含有量が相対的に高く、土壌溶出量基準を上回るが、その 10 倍を超えることは稀である。これは、細粒堆積物の粒子表面や含まれる有機物に吸着していたこれらの元素が比較的溶出しやすいためである。日本列島を構成する堆積岩の多くは海域で形成された地層であるため、これらの元素を一般的に含むことが多い。また、河川の河口付近の汽水域では、海水の影響を受けるため、これらの河川堆積物中にも含まれることが多い。さらに、これらの元素は熱水の影響を受けた岩石にも含まれる場合があり、特異的に全含有量が高く、かつ高い溶出量を示すこともある。

(4) 水銀（Hg）

水銀を産出する鉱山は、熱水性の金属鉱山で、金、銀、鉛、亜鉛とともにこれらに随伴して存在することが多い。堆積岩などに含まれる場合にも火山岩の隣接地域など熱水脈によって濃集したものがある。このような鉱山は北海道の北東部、東北の一部、紀伊半島から東海地域、九州南部から四国中南部などに分布し、火山岩に隣接した熱水変質地帯である。このほか、断層裂かに沿って地殻中の水銀蒸気が上昇し地下水に混入したと考えられる事例^{4,5)}などがある。河川堆積物の全含有量（図 2.2.1）では、一般に 0.3 mg/kg より低く、最頻値は 0.03mg/kg 前後である。ほぼ上記の地質条件に相当する地域で特異的に高い全含有量を示す。

(5) セレン（Se）

「2.1 身近に存在する自然由来の重金属等」に示したように化学的性質が硫黄に類似するため、硫黄、硫化物中に少量含まれて産出される。石炭中に含まれて産することもある。一般的な火成岩や変成岩では比較的その全含有量は少ない。このような傾向から、日本においては、硫化物を主とする金属鉱山周辺や炭鉱地帯などで特異的に高い濃度で分布する可能性がある。また、泥質岩などでは全含有量は著しく小さいものの溶出試験によって検出される事例がある。

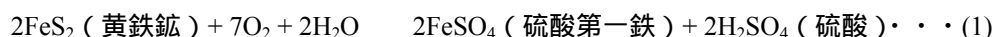
(6) クロム（Cr）

超塩基性岩体（かんらん岩・蛇紋岩体）に多く含まれるクロムは、北海道南部や中国山地中央部・四国山地から九州山地にかけて帯状に分布する。河川堆積物のクロム全含有量の高い地域も、ほぼこのようなクロムを産出する鉱山周辺の河川流域に相当している。その頻度分布は、250mg/kg 程度以下がほとんどで、40mg/kg 前後に最頻値がある。前節で述べたように、これらのクロムはほとんど三価クロムであって、六価クロムではない。但し、蛇紋岩での六価クロムの溶出事例も見られる^{6,7)}。

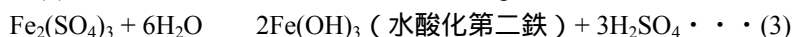
(7) 酸性水の発生と重金属等の溶出

地質体に含まれる硫化鉱物の酸化による酸性水の発生は、古くから酸性坑廃水として、また農業分野では酸性硫酸塩土壌として知られた現象である。酸性水の発生に寄与する主な鉱物は黄鉄鉱で、海成の泥岩や未固結堆積物や硫化鉱物を含む鉱床等に普遍的に含まれる。

桜本⁸⁶⁾によると、黄鉄鉱の酸化による酸性水の発生機構は、以下の化学反応式で示される。



また、(2)で生成した硫酸第二鉄は、水溶液の pH が上昇するに伴い、次の反応により硫酸を生成する。



硫酸第二鉄には強い酸化作用があり、様々な硫化鉱物を酸化させ、各々の重金属等を硫酸塩として溶出させる。例えば方鉛鉱(PbS)、黄銅鉱(CuFeS₂)、閃亜鉛鉱(ZnS)および閃亜鉛鉱などに含まれる硫化カドミウム(CdS)はそれぞれ、Pb, Cu, Zn, Cd を溶出させる。また、黄鉄鉱中に不純物としてひ素を含有することがあり、黄鉄鉱の酸化分解によって溶液中にひ素が溶出することがある。

硫化鉱物を含む岩石・土壌の溶出特性について、資料集 8 に整理したので合わせて参照されたい。

【引用文献】

- 1) 今井登ほか(2004)：日本の地球化学図．産業技術総合研究所地質調査総合センター，209p，<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/geochemmap/index.htm>
- 2) 佐々木靖人・阿南修司・伊藤政美・岩石由来の環境汚染対策研究グループ(2006)：土木分野における自然由来の重金属問題への対応．地質と調査，'06 第2号，8-13．
- 3) 関西圏地盤研究会(2007)：自然地盤に含まれる重金属類．新関西地盤 -大阪平野から大阪湾-2007，229-232．
- 4) 上野祐子ほか(2004)：城南区における地下水水銀汚染事例．福岡県保健環境研究所報，30，117-121．
<http://www.city.fukuoka.lg.jp/data/open/cnt/3/12997/1/H20chikasuikaigishiryoul.pdf>
- 5) 吉田直史ほか(2005)：石川市における地下水水銀汚染について．沖縄県衛生環境研究所報，39，55-61．
- 6) 千葉県嶺岡帯六価クロム調査班(1978)：嶺岡山系蛇紋岩帯における湧水中の Cr()について．地質学雑誌 84，721-727．
- 7) 藤本千鶴・中川保祐・豊倉善夫・三好洋(1979)：嶺岡山系蛇紋岩からの六価クロムの溶出．日本土壤肥料学雑誌，50，164-166．
- 8) 桜本勇治(1994)：海成泥質岩が酸性水を発生させる可能性について．地下水技術，36(4)，29-33．

【参考文献】

- 土木研究所・応用地質・大成建設・三信建設工業・住鉱コンサルタント・日本工営(2007)：建設工事における自然由来の重金属汚染対応マニュアル(暫定版)．土木研究所共同研究報告書第358号，91p．

2.3 重金属等の曝露経路と指定基準

重金属等の有害物質の人への曝露経路については、地下水、大気の摂取、および公共用水域を介した魚介類、農作物といった媒体を通じての曝露、岩石・土壌の摂取（直接摂取）および皮膚接触（吸収）による直接曝露がある。土壌汚染対策法においては、地下水の摂取、土壌の直接摂取の2つの曝露経路による人の健康への影響を考慮した基準が定められている。なお、本マニュアルにおいては、土壌汚染対策法で対象としている地下水の摂取、土壌の直接摂取の2つの曝露経路について、考慮する。

地下水経由の曝露については、土壌溶出量基準が設定されており、直接摂取に関しては土壌含有量基準が設定されている。なお、農作物を介した曝露経路については、農用地の土壌汚染防止に関する法律により農用地の土壌環境基準が設定されているため、自然由来の重金属等を含む岩石・土壌を農用地に造成等に利用する場合は留意が必要である。

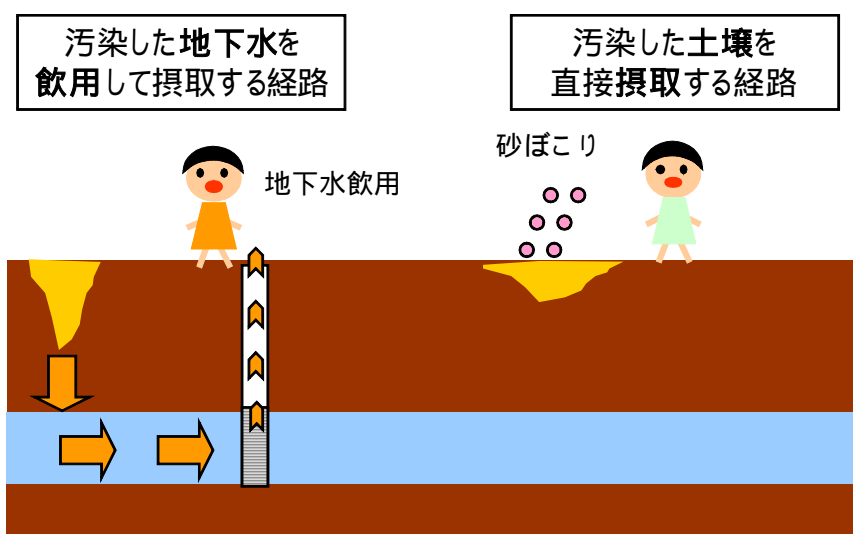


図 2.3.1 地下水経由及び直接摂取による曝露経路（保高、土と地下水と汚染物質（JST、2010））

(1) 土壌溶出量基準値設定の考え方（地下水経由による摂取のリスク）

70 年間、1 日 2 L の地下水を飲用することを想定し、地下水の環境基準や水道水の水質基準と同様の考え方により基準値が設定されている。毒性に関する閾値（化学物質等による生体の反応や中毒・障害の発生しはじめる最小値）がある項目に関しては一生涯にわたりその地下水を飲用しても健康に対する有害な影響がない濃度として基準値を設定している。本マニュアルで対象とする自然由来の重金属等として存在の可能性がある物質に関しては、現在のところすべて毒性に関する閾値があるものとして取り扱われている。一方、揮発性有機化合物などの毒性に関する閾値がない項目（発がん性を有するもの等）に関しては、一生涯にわたりその地下水を飲用した場合のリスク増分が 10 万分の 1 となるレベルをもって基準値を設定している。

(2) 土壌含有量基準値設定の考え方（直接摂取によるリスク）

砂場遊びや屋外で活動をした際に土壌が手に付着しそれを摂取する場合や、飛散した土壌が口に入って摂取するなど直接摂取することによる健康リスクを想定したものである。土壌粒子の皮膚接触（皮膚吸収）による摂取量は、土壌の摂取による摂取量と比較して小さいものとして考慮していない。基準値の設定方法として、汚染土壌の上に 70 年居住するものとしてリスク評価を行う。有害物質の摂取による摂取量は、1 日当たりの土壌摂取量を子供（6 才以下）200mg/day、大人 100mg/day とし、土壌中の土壌含有量を乗じて算出する。曝露頻度は年間 365 日とし、有害物質の吸収率は考慮せず、摂取し、胃酸で溶解したものは 100%体内で吸収されるものとしている。有害物質の摂取量が溶出量基準を設定する際に考慮された地下水からの摂取量と同レベルになるように基準値が設定されている。

2.4 建設工事における自然由来の重金属等への対応

自然由来の重金属等が存在すると予想される地質や地域における建設工事では、計画時から対応について留意が必要である。また自然由来の重金属等への対応の特徴として、その対象となる岩石・土壌の量が膨大なものとなる場合が多く、不適切な対応は周辺環境に及ぼす影響が甚大であるため、適切な対応が必要である。

(1) 対応の基本的な考え方

建設工事における、自然由来の重金属等が存在すると予想される地質や地域への対応の基本的な考え方を以下に示す。なお、施工開始後に自然由来の重金属等を含む岩石・土壌と遭遇した場合についても、本マニュアルの技術的事項は適用可能である。

自然由来の重金属等を含む地質や地域の回避：

自然由来の重金属等を含む地質や地域の存在が調査により判明している場合は、路線や計画区域を見直しも含めて当該地質や地域を避けることを検討する。

掘削する岩石・土壌量の減量：

自然由来の重金属等を含む地質や地域の存在が調査により判明している場合は、工法や施工法の見直しも含めて当該工事の掘削量や岩盤等の露出面積を減らすことを検討する。

掘削した岩石・土壌の現場内利用：

自然由来の重金属等を含む地質や地域の存在が調査により判明している場合は、現場外搬出を避けることを検討するとともに、切盛バランス等を考慮し基準を超過して自然由来の重金属等を含む岩石・土壌をリスク管理しながら適切に現場内で利用することを検討する。

掘削した岩石・土壌の搬出、現場外管理：

都市部のトンネル工事のように掘削した岩石・土壌を現場内にて再利用することが困難な場合は、自然由来の重金属等を含む岩石・土壌を適切に保管できる場所に運搬し、管理することを検討する。なお、保管に関する情報については、台帳などで適切に管理する。なお、本マニュアルの対象外であるが、「汚染土壌の処分方法（平成 15 年 3 月 15 日環境省告示第 20 号）」に準じて自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌を搬出後に現場外処分する場合もある。

(2) 対応事例

建設工事において、自然由来の重金属等が顕在化した主な事例を表 2.4.1 および資料集 15 に示す。その原因としては、トンネル工事により発生した岩石・土壌からの溶出、切土のり面からの溶出、整地などの地山の掘削工事により発生した岩石・土壌からの溶出等がある。トンネル工事や山岳道路などの建設によって、数十万 m^3 にも及ぶ大量の自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌が発生し、対応が必要となった事例もある。また、自然由来の重金属等だけでなく、掘削ずりの風化によって酸性水が発生し、周辺環境に影響を与えた事例も存在することから、岩石・土壌の長期的な環境に対する影響についても留意が必要である。

表 2.4.1 自然由来の重金属等への対応事例

遭遇事例	現場名	顕在化の契機	対策土量または露出面積	対策
トンネル建設工事による発生した岩石・土壌からの溶出	中越トンネル	事業実施区域周辺に銅鉱床が存在することが明らかとなったため、詳細設計時の地質調査ボーリングに重金属調査を追加した。その結果、溶出量基準を超過するひ素を確認した。	800,000m ³	一重遮水シートの盛土内封じ込めによる事業用地内処理
トンネル建設工事による発生した岩石・土壌からの溶出	八甲田トンネル	事業計画時に鉱化変質岩が存在することが明らかになり、酸性水や溶出した重金属等による周辺環境への影響が懸念されたため。	540,000m ³	二重遮水シートの盛土内封じ込めによる事業用地外処理
トンネル建設工事による発生した岩石・土壌からの溶出	仙台市営地下鉄東西線	「土壌・地質汚染評価基本図～仙台地域～2006年」により建設予定地に自然由来の重金属等が分布することが明らかとなり、現地調査を行ったところ、竜の口層にひ素、カドミウムが確認された。このため仙台市が定めた「建設副産物適正処理推進要綱」(H15.5.20制定)に基づき、適切な処理を行うべき検討を開始した。	400,000m ³	底部一重遮水シートおよび覆土の盛土内封じ込めによる事業用地外処理
トンネル建設工事による発生した岩石・土壌からの溶出	甲子トンネル	「甲子トンネル施工技術検討委員会」の提言により重金属調査を実施した。その結果、詳細設計時の地質調査ボーリングコアから土壌溶出量基準を超過する鉛、セレンを確認し、ひ素とカドミウムの長期的な溶出可能性を確認した。	50,000m ³	二重遮水シートの盛土内封じ込めによる事業用地内処理
整地などの地山の掘削工事により発生した岩石・土壌からの酸性水	工業団地調整池	工事前の地質調査では、強酸性を呈する現地周辺ため池の水は確認されなかったが、工業団地造成地内調整池の完成直後に底面の溜まり水が強酸性を呈することを確認した。	6,300m ²	セメント系固化改良土による露出面の表面被覆

第3章 建設工事における自然由来の重金属等への対応

3.1 法的枠組み

本マニュアルの適用にあたっては、「環境基本法」、「土壤汚染対策法」、「農用地の土壤の汚染防止等に関する法律」、「水質汚濁防止法」など、現行の法令を遵守し、関連する条例等との整合も図る。これらの適用にあたっては都道府県等の環境部局と十分に協議する。

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壤の関連する主な法令等は以下の通りである。

(1) 環境基本法（平成 5 年法律第 91 号）

土壤・地下水汚染に関する法体系は、現在および将来の国民の健康で文化的な生活の確保に寄与するとともに人類の福祉に貢献することを目的とした「環境基本法」を根幹としている。その中では、人の活動により環境に加えられる影響であって、環境の保全上の支障の原因となるおそれのあるものを「環境への負荷」、環境の保全上の支障のうち、事業活動その他の人の活動に伴って生ずる相当範囲にわたる大気の汚染、水質の汚濁、土壤の汚染、騒音、振動、地盤の沈下および悪臭によって、人の健康または生活環境に係る被害が生ずることを「公害」と定義している。また、人の健康を保護し、および生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準を「環境基準」と定義している。

土壤の汚染に係る環境基準では揮発性有機化合物等、重金属等、農薬等について定められている。その中でも、自然由来の重金属等として存在の可能性があるカドミウム、鉛、六価クロム、ヒ素、総水銀、セレン、フッ素およびぼう素の環境基準については、汚染土壤が地下水面から離れており、かつ、現状において当該地下水中のこれらの物質の濃度が地下水環境基準を超えていない場合には、それぞれ検液 1L につき 0.03mg、0.03mg、0.15mg、0.03mg、0.0015mg、0.03mg、2.4mg および 3mg と 3 倍の値が基準として示されている。なお、自然由来の重金属等を含む岩石・土壤については環境基準を適用しないこととなっている（土壤の汚染に係る環境基準について（平成 3 年 8 月 23 日環境庁告示第 46 号）。また、揮発性有機化合物等、重金属等、農薬等の 26 物質について地下水環境基準値が定められている。なお、汚染が専ら自然的原因によることが明らかである場合を除いて、環境基準の達成と維持が求められることに留意が必要である。（地下水の水質汚濁に係る環境基準について（平成 9 年 3 月 13 日環境庁告示第 10 号））（資料集 2 - 1 参照）。

(2) 土壤汚染対策法（平成 14 年法律第 53 号）

土壤汚染対策の実施を図り、もって国民の健康を保護することを目的とした「土壤汚染対策法」は、土壤汚染の状況調査、土壤汚染による人の健康被害の防止に関する措置等を規定している。この中では、指定基準として揮発性有機化合物等、重金属等、農薬等の 25 物質については土壤溶出量基準、さらに重金属等の 9 物質については土壤含有量基準が示されている。

(3) 農用地の土壤の汚染防止等に関する法律（昭和 45 年法律第 139 号）

田畑などの農用地については、人の健康をそこなうおそれがある農畜産物が生産され、または農作物等の生育が阻害されることを防止し、もって国民の健康の保護および生活環境の保全に資することを目的とした「農用地の土壤の汚染防止等に関する法律」が存在する。この中では、カドミウム、銅、ヒ素を特定有害物質に指定し、土壤に含まれる特定有害物質だけでなく、米に含まれる特定有害物質も対象に基準が定められている。なお、これらの基準を超過する自然由来の重金属等を含む岩石・土壤を、農用地の造成等に利用する場合は適切に対応するものとする。

(4) 水質汚濁防止法（昭和 45 年法律第 138 号）

地下水については、公共用水域および地下水の水質の汚濁の防止を図り、もって国民の健康を保護するとともに生活環境を保全し、並びに工場および事業場から排出される汚水および廃液に関して人の健康に係る被害が生じた場合における事業者の損害賠償の責任について定めることにより、被害者の保護を図ることを目的とした「水質汚濁防止法」によって保全が図られている。

表 3.1.1 土壌・地下水汚染に係る基準値（自然由来の重金属等に関するものを抜粋）

特定有害物質の種類	環境基本法		土壌汚染対策法			農用地の土壌の汚染防止等に関する法律
	土壌環境基準 (mg/L)	地下水環境基準 (mg/L)	指定基準		第二溶出量基準 (mg/L)	指定要件
			土壌溶出量 (mg/L)	土壌含有量 (mg/kg)		
カドミウム及びその化合物	0.01 以下 農用地では 米 1kg につき 1mg 未満	0.01 以下	0.01 以下	150 以下	0.3 以下	米 1kg につき 1mg 未満
六価クロム化合物	0.05 以下	0.05 以下	0.05 以下	250 以下	1.5 以下	-
水銀及びその化合物	0.0005 以下 アルキル 水銀は不検出	0.0005 以下 アルキル 水銀は不検出	0.0005 以下 アルキル 水銀は不検出	15 以下	0.005 以下 アルキル 水銀は不検出	-
セレン及びその化合物	0.01 以下	0.01 以下	0.01 以下	150 以下	0.3 以下	-
鉛及びその化合物	0.01 以下	0.01 以下	0.01 以下	150 以下	0.3 以下	-
砒素及びその化合物	0.01 以下 農用地(田に限る) では、土壌 1kg につ き 15mg 未満	0.01 以下	0.01 以下	150 以下	0.3 以下	土壌 1kg につき 15mg 未満 (田に限る)
ふっ素及びその化合物	0.8 以下	0.8 以下	0.8 以下	4000 以下	24 以下	-
ほう素及びその化合物	1 以下	1 以下	1 以下	4000 以下	30 以下	-
銅又はその化合物	農用地(田に限る) では、土壌 1kg につ き 125mg 未満	-	-	-	-	土壌 1kg につき 125mg 未満 (田に限る)
出典	平成 3 年 8 月 23 日環 境庁告示第 46 号	平成 9 年 3 月 13 日 環境庁告示第 10 号	平成 14 年 12 月 26 日 環境省令第 29 号			昭和 46 年 6 月 24 日政令第 204 号

- 1 土壌溶出量とは土壌に水を加えた場合に溶出する物質の量を、土壌含有量とは土壌に含まれる物質の量をいう。
- 2 土壌溶出量は平成 15 年 3 月 6 日環境省告示第 18 号、土壌含有量は平成 15 年 3 月 6 日環境省告示第 19 号により測定したもの。
- 3 「不検出」とは、その結果が法令に定められた方法の定量下限値を下回ることをいう。

(5) その他の法令、条例等

関連する法令として「大気汚染防止法」、「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」などがある。また、汚染土壌、建設発生土及び地下水の取り扱いについては条例等によって、より厳しい基準値の採用（上乘せ基準）対象物質および適用範囲の拡大（横出し基準）が存在する場合があるため、留意が必要である（資料集 2 - 2 参照）。

3.2 バックグラウンド値

対象地域において地下水、表流水に平均的に含まれる自然由来の重金属等の濃度、岩石・土壌に同様に含まれる自然由来の重金属等の全含有量・溶出量を、バックグラウンド値として設定できる。

地下水のバックグラウンド値

工事着手前の自然由来の重金属等の地下水濃度とし、主にリスク評価、対策効果の確認に用いる。

表流水のバックグラウンド値

工事着手前の自然由来の重金属等の表流水濃度とし、主に施工管理、対策効果の確認に用いる。

岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値

人為的な影響を受けていない土地の自然由来の重金属等の全含有量とし、主に自然由来と人為由来の汚染の識別に用いる。

自然由来の重金属等は広範囲に分布するため、その影響が工事着手前に顕在化している場合もある。そこで、自然由来の重金属等の影響が建設工事に起因するものが明確にするために、地下水および表流水の自然由来の重金属等の濃度、周辺に存在する岩石・土壌の自然由来の重金属等の全含有量・溶出量を工事着手前に測定し、リスク評価や施工管理等に活用する。ただし、現場状況によっては、観測井戸等の数が少ないなど信頼性のあるバックグラウンド値の設定が困難な場合もある。その場合、バックグラウンド値の設定は必要ない。

(1) 地下水（以下、地下水のバックグラウンド値）

リスク評価等に活用するために、地下水のバックグラウンド値を把握する。具体的には、周辺に存在する都道府県等が監視する観測井戸等の地下水の水質検査結果に基づいて地下水のバックグラウンド値を決定する。ただし、流速・流向などの地下水状況に関する既存の情報についても収集し、当該井戸等の水質が対策実施予定区域の水質を代表していることを確認するために、詳細な地下水の流況を把握することが望ましい。

また、対策実施予定区域に1カ所以上観測井を設置することによりバックグラウンド値を設定することも可能である。その場合、季節変動を考慮するために、年4回以上、可能であれば2～3年継続的に観測し、観測井毎の年間平均濃度をバックグラウンド値とする。観測深度は、地質および地下水状況を考慮し対象となる自然由来の重金属等の影響を適切に評価できる深度とする。これらの観測井はモニタリング時にも活用することにより、継続的に工事実施前後の影響を比較することが可能であるため、その位置は工事終了後もモニタリングを継続できる地点に設定することが望ましい。具体的な地下水質の測定方法については「第7章 モニタリング」に示す通りである。

(2) 表流水（以下、表流水のバックグラウンド値）

施工管理等に活用するために、表流水のバックグラウンド値を把握する。現地の表流水の化学組成・流動状況の情報を考慮して、既存の河川水等の水質検査結果に基づいて表流水のバックグラウンド値を決定する。

また、対策実施予定区域もしくはその近傍の河川水や沢水、湧水などの水質を対象毎に1カ所以上測定することによりバックグラウンド値を設定することも可能である。その場合、季節変動を考慮するために、年4回以上、可能であれば2～3年継続的に観測し、対象毎の年間平均濃度をバックグラウンド値とする。これらの観測点はモニタリング時にも活用することにより、継続的に工事実施前後の影響を比較することが可能であるため、その位置は工事終了後もモニタリングを継続できる地点に設定することが望ましい。具体的な水質の測定方法については「第7章 モニタリング」に示す通りである。

(3) 岩石・土壌の全含有量（以下、岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値）

自然由来の重金属等と人為由来汚染の識別等に活用するために、岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値を把握する。具体的には、自然由来の重金属等を含む岩石・土壌について、周辺に存在する同様の起源を持つ岩石・土壌の全含有量を測定し、その平均値をバックグラウンド値とする。当該地内および周辺の人為的な影響を受けていない岩石・土壌を対象とすることが重要である。具体的な調査・試験・評価方法については「4.8 スクリーニング試験および岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験」に示す。

また、記載データの採取方法や試験方法を把握した上で、「地圏環境インフォマティクス GENIUS」（東北大学大学院環境科学研究科）、「表層土壌評価基本図」（産業技術総合研究所）、「土壌・地質汚染評価基本図」（産業技術総合研究所）など既存資料を有効活用することも検討する。

その他、現場によっては重金属等の溶出量をバックグラウンド値として用いることも可能であることから、必要に応じて測定の実施を検討する。試料の採取、試験の実施に当たっては、岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値の把握に必要な事項に加えて、試料の状態（風化や酸化還元雰囲気等）が溶出量に与える影響が大きい点に留意が必要である。

3.3 対応の流れ

建設工事において自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌に起因する人の健康への影響のおそれがある場合、現場条件を勘案し、工事の段階に応じて適切な調査、試験、評価、対策およびモニタリングを実施し、以下の目標を達成する。

地下水等の摂取による影響の回避・軽減

直接摂取による影響の回避・軽減

なお、対応が必要な岩石・土壌を工事实施区域外へ搬出して仮置きする場合には、搬出土量を把握し、対策終了の時点まで適切に管理する。

(1) 対応の目標

本マニュアルでは、建設工事の実施によって自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌による人の健康への影響のおそれが新たに発生する場合に、以下の目標を達成するための対応を実施する。なお、土壌汚染対策法に準じた対応を実施する場合は、この限りではない。

地下水等の摂取に関する目標

敷地境界もしくは保全対象近傍において地下水環境基準もしくは地下水のバックグラウンド値のうち高い方を超過しないこと

直接摂取に関する目標

直接経口摂取の経路を遮断すること

(2) 対応の流れ

上記の目標を達成するため、自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌を掘削、盛立、埋立等行う場合の対応は、原則として以下のとおり実施する（図 3.3.1）。また、これらの岩石・土壌を搬出し、現場外において管理する場合についても、本マニュアルの技術的事項を参考に適切に対応することが可能である。なお、事業者以外が所有する土地に処分を行う場合においては、地権者の同意を得ると共に将来の適切な管理に関する取り決めを行う必要がある。

また、受け入れ先およびストックヤード等が求める基準に従い品質を確認した岩石・土壌は、現場外に搬出し、利用することができる。

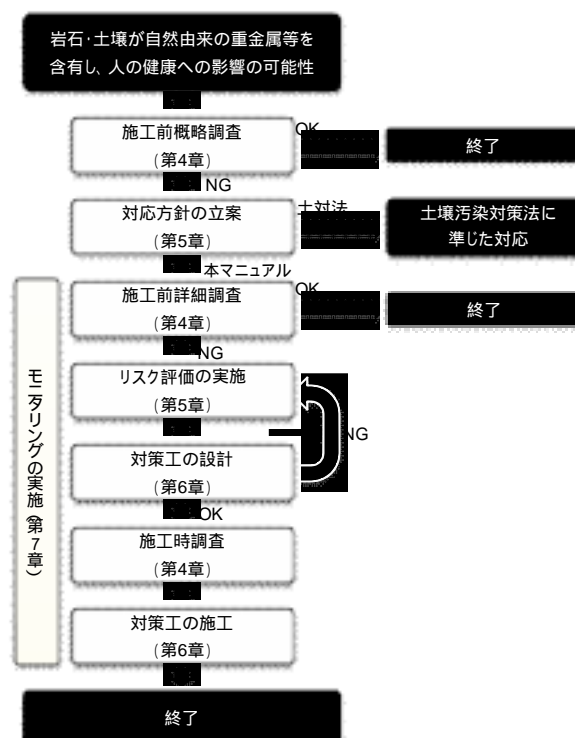


図 3.3.1 対応の流れ

施工前概略調査

施工前概略調査では、自然由来の重金属等の概況を把握し、対応方針立案の基礎となる情報を収集する。資料等調査、地質調査、試料採取、全含有量によるスクリーニング試験や溶出試験を実施し、対応が必要な地質と重金属等、およびそれらの分布の概略を把握する。また、建設工事に伴う現場周辺環境への影響予測を行うリスク評価の基礎資料を得るため、水文調査（4.5 参照）を行う。

対応方針の立案

施工前概略調査においてスクリーニング試験と溶出試験の結果が本マニュアルに示す基準（表 4.8.6、4.8.7 及び表 3.1.1）を満たさない場合は、今後の対応方針を立案する。その後、施工前概略調査の結果をもとに曝露経路、周辺状況などについて検討し初期サイト概念モデルを構築する。なお、土壤汚染対策法や条例等の対象となる場合は、同法や条例等に基づいた対応を図ることとなるが、同法や条例等の対象外であっても都道府県等の環境部局との協議の結果、土壤汚染対策法に準じた対応を実施する場合もある。

施工前詳細調査

施工前詳細調査では、リスクの評価、対策の設計、モニタリング計画の立案を行うために必要となる情報を収集する。構築した初期サイト概念モデルを参考に、対応が必要な地質と重金属等に重点を置いた詳細な地質調査、試料採取、試験（スクリーニング試験および溶出試験等）を実施する。その結果を建設工事や対策の設計・施工計画に反映する。また、施工前概略調査に引き続いて水文調査を行うとともに、リスク評価に必要な地盤特性を把握する試験および施工中の迅速判定方法の検討を実施する。

リスク評価の実施

施工前詳細調査の結果をもとに、より精度の高いサイト概念モデルを構築し、対策の選定・設計に必要なリスク評価を実施する。リスク評価では、地下水等の摂取および直接摂取の二つの曝露経路について、それらの影響を検討する。

対策の設計

リスク評価の結果に基づき、必要に応じて適切な対策を実施する。現地の状況に応じて地下水等の摂取および直接摂取によるリスクを回避ないしは低減する対策を選択し、設計するとともに、モニタリング計画を立案する。

施工中調査

地質調査、試料採取、迅速判定試験により対策が必要な岩石・土壌を判定する。

対策の施工

対策が必要な岩石・土壌を対象に対策の設計に基づき適切に施工を行う。対策を施工するにあたり、現場内および周辺への重金属等の拡散を防止するため、適切かつ合理的な施工計画を立案し、実施する。さらに、施工に伴う労働環境にも適切に対応するものとする。

モニタリングの実施

モニタリングは、バックグラウンド値の把握、施工による周辺環境への影響、施工後の対策効果の確認等を目的として、現地の状況に応じて計画を立案し、実施する。

(3) 搬出・仮置き時の留意点

対応が必要な自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌を現場外に運搬し、仮置きする場合は、荷台を遮水シートで覆うなど運搬時の重金属等の拡散防止策を実施する。また、仮置き場においては他の建設発生土との混合を避けるとともに、重金属等の拡散がないように地下水への浸透防止のためシートを敷き、また飛散防止のためシートでの覆いを設けるなど適切な対策を実施する。また、自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌の情報について管理できるよう管理票を作成し、保存する。

(4) 周辺住民とのリスクコミュニケーション

施工前調査や施工中調査の結果、対応が必要な自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌の存在が確認された場合は、適切な段階で周辺住民や自治体を含む関係機関に必要な応じて報告を行う。また、今後の対応に関して適切な情報の開示や協議を行うなど、周辺住民等に対して十分な配慮が必要である。情報提供の手段としては、住民説明会等を含む説明文書等の配布・回覧、有識者による検討会の設置等がある。

（参考：「土壤汚染に関するリスクコミュニケーションガイドライン」環境省水・大気環境局，2008）

(5) 情報の管理

対策の実施後、対策実施区域、対策内容等の自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌の情報について管理台帳

等を整備し記録として保存し、管理に活用する。

第4章 調査・試験方法

4.1 調査および試験の手順

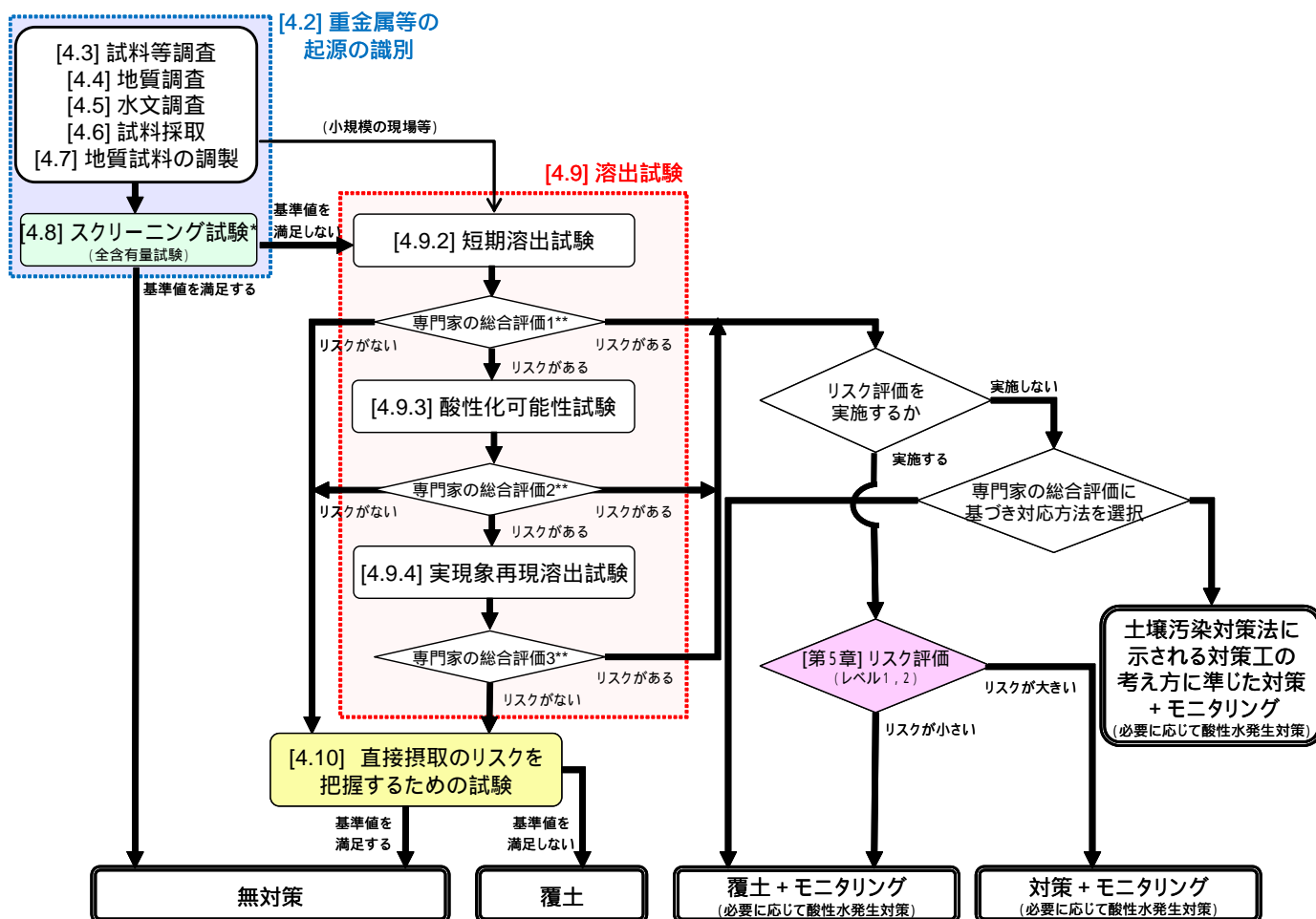
自然由来の重金属等に関する調査および試験は、原則として、「地質調査、水文調査」、「試料採取と地質試料の調製」、「スクリーニング試験」、「溶出試験」を一連の組み合わせとして行う。

(1) 調査および試験の原則

自然由来の重金属等に関する調査および試験は、原則として、「地質調査、水文調査」、「試料採取と地質試料の調製」、「スクリーニング試験」、「溶出試験」を一連の組み合わせとして行う（図 4.1.1）。なお、溶出試験の流れの詳細は、「4.9.1 溶出試験の概要」を、直接摂取のリスクを把握するための試験については「4.10 直接摂取のリスクを把握するための試験」を参照されたい。

資料等調査などに基づき、「4.2 重金属等の起源の識別」を参考にして対象地域内に人為的な土壤汚染が存在しないことを確認する。具体的な地質調査、水文調査および試料採取の方法は、調査を実施しようとする時期の工事の段階（後述の「工事の各段階の調査および試験」参照）に合わせた調査を中心に行う。

なお、土壤汚染対策法や条例等の対象となる場合は、同法や条例等に基づいた対応を図ることとなるが、同法や条例等の対象外であっても都道府県等の環境部局との協議の結果によっては、同法に準じた対応を実施する場合もある。



(2) 工事の各段階の調査および試験

工事の規模が大きくかつ長期間にわたる場合には、効率的に重金属等の溶出量等を把握するために、工事の段階ごとに系統的な調査および試験（図 4.1.2）を行う必要がある。ここでは工事の段階を「施工前段階」の前期、「施工前段階」の後期、「施工中段階」の各時期に区分して解説する。

1) 「施工前段階」の前期の調査・試験（施工前概略調査）

当該工事において自然由来の重金属等に関する対策の要否の判断材料を得ることを目的とする。資料等調査などに基づき地質調査の範囲および内容の絞り込みを行う。地質調査では対象地域における地質の分布を把握するとともに、構成地質毎に、空間的に偏りのないよう複数の試料採取を行い、得られた試料のスクリーニング試験を実施する。なお、本試験は岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値の試験を兼ねる。スクリーニング試験の基準値を超過した地質については溶出試験を実施する。試験の結果に基づき、以後の段階で詳しく調査をすべき地質の絞り込みを行う。これと並行して水文調査によって工事施工前の表流水、地下水の状況を把握する。なお以後の調査で実現象再現溶出試験を行おうとする場合は、試験に時間を要するのでこの時期に開始しておくことが望ましい。

2) 「施工前段階」の後期の調査・試験（施工前詳細調査）

施工前概略調査におけるスクリーニング試験および溶出試験の結果、工事实施（予定）区域において自然由来の重金属等の問題が生じる懸念がある場合には、リスク評価、対策の選定・設計・施工に必要な調査・試験を行う。この段階でのスクリーニング試験は、対象となる地質について施工前概略調査において既に実施された場合には省略できる。また、施工中段階において岩石・土壌の管理や対策の要否を判定する試験として、スクリーニング試験や溶出試験の代わりに迅速判定試験を用いる場合は、迅速判定試験による判定方法および判定基準を構築する。

この段階では、前述の施工前概略調査に基づき、詳しく調査をすべき地質を中心に調査・試験を実施する。また、施工前概略調査に基づきスクリーニング試験における試験対象元素の絞り込みを行う。試料採取は、地質の状況によって異なるので現場毎にその頻度を決定する。施工前概略調査において構成地質ごとのスクリーニング試験および溶出試験の結果が不足している場合には、適宜この段階の調査・試験で補い、対策が必要な地質およびその土量を把握し、調査結果を施工計画に反映させる。これと平行して引き続き水文調査を実施し、工事施工前の表流水、地下水の状況を把握する。

3) 「施工中段階」の調査・試験（施工中調査）

施工中調査は施工管理を適切に行うことを目的とする。この段階でのスクリーニング試験および溶出試験は、対象となる地質について施工前調査において既に実施された場合には省略できる。試料採取は、詳しく調査をすべき地質について、試料の代表性を考慮して1日に（先進ボーリングコアからの試料採取においては実施工において概ね1日の掘進長に対して）複数回（点）行い、これらを均質に混合して1試料として試験する。ただし、施工前詳細調査までの調査に基づいて予測したものと異なる地質が出現した場合は、必要に応じてそれまでの試料と混合せず、別途、試験する。また、岩石・土壌の管理や対策の要否を判定する試験として、迅速判定試験を用いることもできる。これと平行して引き続き水文調査を実施し、工事施工中の表流水、地下水の状況を把握する。

具体的な手順は次の通りである（図 4.1.2）。

重金属等の起源の識別（資料等調査など）

施工前概略調査

- (ア) 資料等調査
- (イ) 地質調査、水文調査
- (ウ) 試料採取と地質試料の調製
- (エ) スクリーニング試験、岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験
- (オ) 溶出試験

施工前詳細調査

- (ア) 地質調査、水文調査
- (イ) 試料採取と地質試料の調製
- (ウ) スクリーニング試験、岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験
- (エ) 溶出試験
- (オ) 迅速判定試験の判定方法・基準の構築

施工中調査

- (ア) 地質調査、水文調査

- (イ) 試料採取と地質試料の調製
- (ウ) スクリーニング試験、岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験
- (エ) 溶出試験
- (オ) 迅速判定試験

工事の規模が小さく、排出される土量が少ない場合には、スクリーニング試験を省略し、「4.9.2 短期溶出試験」および「4.10 直接摂取のリスクを把握するための試験」をスクリーニング試験の代わりとすることができる。

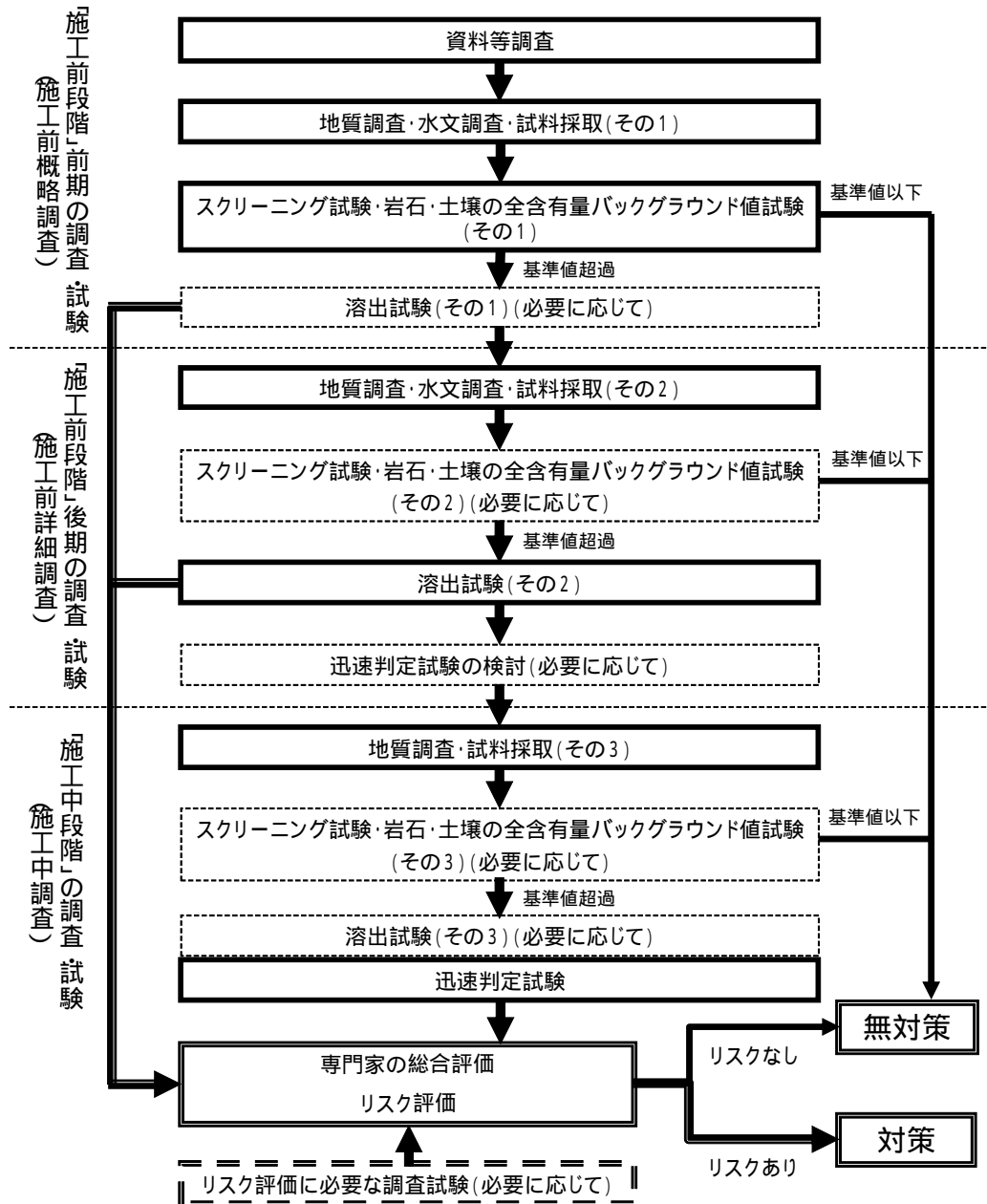


図 4.1.2 工事の段階ごとの調査・試験の流れ

重金属等の起源の識別は資料等調査、地質調査、水文調査の結果に基づき適宜行う。溶出試験の詳細な流れは図 4.1.1 を参照。

4.2 重金属等の起源の識別

土地の使用履歴等に関する調査、重金属等の存在に関する地質調査、水文調査および試料の分析結果に基づき、岩石・土壌に含まれる重金属等が自然由来であるか人為由来であるかを識別する。

(1) 重金属等の起源の識別の必要性

対象地域の岩石・土壌あるいは地下水中の重金属等による人の健康への影響のおそれがある場合、重金属等の起源が自然由来、あるいは人為由来であるかによって、以後の対応が異なるため、重金属等の起源を識別する必要がある。

識別の結果、重金属等の起源が人為由来の汚染である場合には、本マニュアルによらず、「土壤汚染対策法」、「水質汚濁防止法」、条例等、もしくは「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル〔暫定版〕」に基づき対応する。また、対象地域に鉱区が設定されている場合には「鉱山保安法」が関係するので、関係機関と対応を協議する必要がある。

(2) 重金属等の起源の識別の観点

岩石・土壌に含まれる重金属等の起源が自然由来であるかどうかを識別するためには、以下の点を考慮して調査をすることが有効である。ただし、これらの判断に当たっては、現場の状況を総合的にとらえる必要があることから、専門家の助言を求めることが望ましい。

1) 重金属等の起源が自然由来である可能性が高い場合

- ）有害物質使用特定施設などが立地していない、特定有害物質の漏洩記録がないなど、人為的汚染の原因となる土地利用が過去になされていない場合。
- ）岩石・土壌の全含有量ないしは溶出量について、高濃度を示す場所が土地の使用履歴とは関係せず、深部に向かって濃度の低下が顕著でない場合。ただし、鉱床・鉱脈、変質帯や温泉近傍では自然由来であっても深部に向かって濃度の低下が見られる場合もある。
- ）特定の地質に特定の物質が偏在する場合（「2.2 自然由来の重金属等の分布」参照）。
- ）対象地域における地下水中の重金属等の濃度について、周辺の広域に分布する地下水中の濃度と大きな違いがない場合。
- ）後述の(3)に示す調査に基づき、重金属等の起源が自然由来であると考えられる場合。

2) 重金属等の起源が人為由来である可能性がある場合

- ）有害物質が天然に存在する鉱物として存在していない場合。例えば鉛が方鉛鉱として存在する場合には自然起源であり、金属鉛の場合には人為汚染であると考えられる。
- ）鉱床・鉱脈、変質帯や温泉近傍でないにもかかわらず、短期溶出試験（「4.9.2 短期溶出試験」参照）による溶出量が土壤溶出量基準の10倍を超過する場合。このような場合には人為的汚染の可能性について、慎重に検討する必要がある。

(3) 重金属等の起源の識別のための調査

重金属等の起源を識別するための調査は、以下の調査を現場状況に応じて実施する。

1) 資料等調査

土地の使用履歴および特定有害物質の漏洩の記録を把握することと、対象地域周辺の地質に自然由来の重金属等が含まれる可能性について把握する目的で、資料等調査を行う。詳細は「4.3 資料等調査」を参照されたい。

土地の使用履歴としては、対象物質を取り扱う事業場が過去に立地していた、あるいは現在立地しているかどうかを調査する。特定有害物質の漏洩の記録については都道府県等の環境部局に問い合わせを行う。その結果、対象の土地に有害物質使用特定施設が立地していたことが明らかになった場合、あるいは特定有害物質の漏洩の記録が確認された場合には、人為的汚染の可能性がある。

また、地質については一般的な地質図・地質データのほか、鉱山・温泉・鉱化帯・変質帯などの分布を示す資料を収集し、地質の成因等を把握しておく。重金属等の種類と地質との対応関係については「2.2 自然由来の重金属等の分布」を参照されたい。これまでの調査結果からは、短期溶出試験の結果、自然的原因で溶出量基準値を超過する元素として、ヒ素、フッ素、ほう素、鉛が多く、カドミウム、セレンがこれに続き、まれに水銀が超過する。六価クロムについてはほとんど天然に存在しないが、蛇紋岩地域の地下水および蛇紋岩試料の溶出試験結果からの検出事例^{1,2)}がある。

2) 地質調査

対象地域周辺の地質調査は、基本的に「4.4 地質調査」の「施工前概略調査」および「4.6 試料採取」により行う。

対象地域に存在する重金属等が自然由来であると識別するためには、採取した地質試料を対象に各種試験を実施し、重金属等の分布の局在性、垂直的な濃度分布を把握するだけでなく、対象地域が天然に存在しない物質で汚染されていないことを確認する（資料集3参照）。さらに、対象地域の岩石・土壌と周辺の広域に分布する岩石・土壌の全含有量が同程度であることを「4.8 スクリーニング試験および岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験」などにより確認する。

3) 水文調査

対象地域周辺の水文調査は、基本的に「4.5 水文調査」の「施工前調査」および「4.6 試料採取」により行う。

対象地域に存在する重金属等が自然由来であると識別するためには、水質試料の分析によって、対象地域が天然に存在しない物質で汚染されていないことを確認する。さらに、対象地域の地下水と周辺の広域に分布する地下水の濃度が同程度であることを確認する。

【引用文献】

- 1) 千葉県嶺岡帯六価クロム調査班(1978): 嶺岡山系蛇紋岩帯における湧水中の Cr()について .地質学雑誌 ,84 , 721-727 .
- 2) 藤本千鶴・中川保祐・豊倉善夫・三好洋(1979): 嶺岡山系蛇紋岩からの六価クロムの溶出 . 日本土壤肥料学雑誌 , 50 , 164-166 .

4.3 資料等調査

対象地域の地形・地質、水理特性・水質、気象条件、保全対象（予定）区域の現況、対象地域周辺の土地利用履歴、特定有害物質使用履歴、当該工事などに関する既存資料を収集、整理する。

(1) 調査の目的

資料等調査の目的は、対象地域の自然由来の重金属等の存在状況、表流水・地下水の状況および人為的な土壌汚染の有無の可能性を把握すること、およびリスク評価の基礎資料を得ることである。

(2) 調査の対象地域

対象地域は工事实施（予定）区域および対策実施（予定）区域、保全対象（予定）区域およびそれらの周辺とする。

(3) 調査の概要

収集した鉱山・温泉・鉱化帯・変質帯・海成層などの資料および地質図・地質データから、自然由来の重金属等を含有する地質が存在する可能性を検討する。地形図・地形データから対象地域の流域区分を行い、水理特性に関する資料とあわせて表流水・地下水に関する状況を取りまとめる。気象条件に関する資料からは、対象地域の年間降水量を推定する。保全対象（予定）区域の現況に関する資料からは、工事によって自然由来の重金属等による人の健康への影響が及ぶ範囲、その経路等の概略を推定する。土地利用履歴、特定有害物質使用履歴に関する資料からは、対象地域内における人為的な土壌汚染の有無についてとりまとめ、重金属等が自然由来かどうかの判断資料の一つとする。

(4) 地形・地質に関する資料収集

1) 一般的な地形・地質

地形図・地形データ

収集可能な地形図としては例えば以下のようなものがある。これらは縮尺によって広域的な地形の把握に必要なものと詳細検討に必要なものがあり、小縮尺のものから大縮尺のものまで網羅して収集しておく。

- ・ 2万5千分の1地形図、1万分の1地形図、火山基本図（1万分の1または5千分の1）、国土基本図（5千分の1）（国土地理院）
- ・ 森林基本図（林野庁）
- ・ 都市計画図（各自治体）

また、収集可能なデジタル地形データとしては例えば以下のようなものがある。

- ・ 数値地図 50m メッシュ（標高）、数値地図 10m メッシュ（火山標高）、数値地図 5m メッシュ（標高）（国土地理院）

なお、対象地域の範囲内に既存の航空機レーザー測量のデータが存在する場合には、当該データを使用して詳細な地形図を作成できるため、収集しておく。

地質図・地質データ

対象地域に限定した自然由来の重金属等に関する既存資料はきわめて少ないと考えられるため、「地質図・地質データ」は、対象地域と同一地質が分布するなどの広域の範囲を調査範囲とする必要がある。

収集可能な地質図としては、例えば以下のようなものがある。なお、地質に関しては研究の進展により新たな解釈がなされる場合があり、それに伴い自然由来の重金属等を含有する地質の分布、構造等に係る解釈が異なっている可能性がある。したがって、特に地質図の発行年が古い場合には、論文等を収集して最新の知見に基づく地質構造を把握することが重要である。

- ・ 20万分の1地質図、5万分の1地質図、7万5千分の1地質図（産業技術総合研究所（旧地質調査所））
- ・ 20万分の1土木地質図（国土交通省各地方整備局（旧地方建設局）、土木地質図編纂委員会）
- ・ 都道府県別地質図（各都道府県）
- ・ 土地分類基本調査 5万分の1表層地質図

また、収集可能なデジタル地質データとしては、例えば以下のようなものがある。

- ・ 20万分の1数値地質図幅集（産業技術総合研究所（旧地質調査所））
- ・ 20万分の1日本シームレス地質図（産業技術総合研究所）

2) 鉱山・温泉・鉱化帯・変質帯・海成層・超塩基性岩など

鉱山・温泉・鉱化帯・変質帯およびその周辺は、特定の元素が高濃度で存在する可能性がある。また、海成層はひ素や硫化鉱物を広く含み、蛇紋岩などの超塩基性岩は六価クロムを含む可能性があるなど、元素・鉱種の分布が特定の地質に関連づけられるものもある。したがって、それらの分布と含まれる元素・鉱種について調査する必要がある。

対象地域に限定した自然由来重金属等に関する既存資料はきわめて少ないと考えられるため、鉱山・温泉・鉱化帯・変質帯・海成層・超塩基性岩などに関する資料は、対象地域と同一地質が分布するなどの広域の範囲を調査範囲とする必要がある。また、対象とする元素・鉱種については、自然由来の重金属等ならびに酸性水発生に関連する硫化鉱物に限定するのではなく、それらと関連性を持つと考えられる元素・鉱種（例えばカドミウムと相関性のある亜鉛など）も含め、幅広く情報を収集する必要がある。

鉱山・温泉・鉱化帯・変質帯に関する収集可能な資料としては、例えば以下のようなものがある。これらの他にも産業技術総合研究所の地質図類には鉱山、温泉、鉱化帯、変質帯などについて記されているものがあるので、必要に応じて収集する。なお、海成層や超塩基性岩などに特化した資料はないので、「1) 一般的な地形・地質」に関する資料収集・整理の際に海成層や超塩基性岩などに関しても、資料を収集し、整理しておく。

- ・ 鉱山に関する台帳：日本国内の鉱山保安業務を行っている経済産業省資源エネルギー庁原子力安全・保安院鉱山保安課の下部組織である各地区の産業安全監督部（支部・事務所を含む）が所有する。
- ・ 日本鉱産誌（旧地質調査所）：Ia 巻が「主として金属材料となる鉱石 金・銀・その他」、Ib 巻が「主として金属材料となる鉱石 銅・鉛・亜鉛」、Ic 巻が「主として金属材料となる鉱石 鉄・鉄合金および軽金属」であるが、絶版である。
- ・ 日本温泉・鉱泉分布図および一覧（産業技術総合研究所）：日本全国の温泉・鉱泉総計 4,536 箇所のデータが収録された数値地質図である。
- ・ 日本の地球化学図（産業技術総合研究所）：日本全国の元素の濃度分布が記されている。
- ・ 日本の熱水系アトラス（産業技術総合研究所）：全国から 7,203 個の温泉化学分析値データと 3,066 個の坑井地温データを収集し、熱水系化学組成の地域性や各種の地化学温度計による熱水貯留層温度を全国規模で図化している。
- ・ 50 万分の 1 鉱物資源図（産業技術総合研究所）：鉱床の分布、鉱床名、規模、鉱種等が記されている。
- ・ 5 万分の 1 土壌・地質汚染評価基本図（産業技術総合研究所）：土壌や堆積物中の重金属等の全含有量、溶出量のバックグラウンド値に関する情報が記された数値地質図である。ただし、刊行地域は 2010 年 2 月現在で「仙台」「姉崎」の 2 地域のみである。
- ・ 表層土壌評価基本図（産業技術総合研究所）：表層土壌中の重金属等の全含有量、土壌含有量、土壌溶出量に関する情報が記された数値地質図である。ただし、刊行地域は 2010 年 2 月現在で「宮城県地域」「鳥取県地域」の 2 地域のみである。

(5) 水理特性・水質に関する資料収集

水理特性・水質に関する収集可能な資料としては、例えば以下のようなものがある。

- ・ 井戸台帳：各自治体の環境部局、水道部局等が所有する。なお、個人所有の小規模井戸の情報については必要に応じてヒアリングなどで収集する必要がある。
- ・ 水理地質図（産業技術総合研究所）（旧地質調査所）：地下水や表流水の水質、地下水位などについて記されている。
- ・ 河川の流量：国土交通省・都道府県等の管理機関が河川に設置している流量観測点のデータを収集する。対象地域内の観測点についてはもれなくデータを収集するが、対象地域に限定するとデータが得られない場合が多いので、同一水系など対象地域を囲む周辺の観測点のデータも収集する。
- ・ 公共用水域の水質測定結果：都道府県等の環境部局が保有する。

(6) 気象条件に関する資料収集

対象地域の気象条件として、降水量および気温のデータを収集し、整理する。収集可能な気象データとしては、気象庁の地域気象観測システム「アメダス（AMeDAS）」のデータがあり、降水量、気温、風向、風速等の 10 分間毎、時間毎、日毎、月毎、年毎等のデータのほか、各月・年の平年値を検索可能である。これらのうち、特に降水量および気温に関する複数年にわたる資料を収集、整理する。対象地域内の観測点についてはもれなくデータを収集するが、対象地域に限定するとデータが得られない場合が多いので、対象地域を囲む周辺の観測点のデータも収集する。

また、道路・河川等の管理のため国土交通省・都道府県等の管理機関が設置しているテレメータ等のデータが入手可能であれば、併せて収集する。

(7) 保全対象（予定）区域の現況に関する資料収集

人家・集落等の人が居住する箇所、道路・公園等の不特定多数の人が通行あるいは立ち入りする箇所、地下水・表流水・湧水等の利用地点および利用状況、土地利用の状況など、保全対象地域の現況に関する資料を収集し、整理する。

これらに関しては(4)の地形図、(5)の井戸台帳、住宅地図および土地条件図（国土地理院）が情報源となる。

(8) 土地利用履歴および特定有害物質使用履歴に関する資料収集

人為的な土壌汚染の可能性を検討し、対象地域における重金属等が自然由来か否かの判断資料の一つとするため、過去の土地利用履歴、特定有害物質使用履歴等に関する資料を収集し、整理する。これらに関する収集可能な資料としては、例えば以下のものがある。

- ・空中写真（航空写真）：全国的に収集可能なものとして、国土地理院および林野庁撮影の空中写真が複数時期ある（撮影時期および縮尺は地域によって異なる）。同じく全国的に収集可能なものとして、米軍撮影の空中写真も国土地理院で入手可能である。これらを網羅して収集する。これらのほか、国土交通省、都道府県、自治体、民間等が撮影した空中写真が入手可能であれば、併せて収集する。
- ・旧版地形図：全国的に収集可能なものとしては、国土地理院発行の各種地形図の旧版がある。複数時期のものを網羅して収集する。
- ・住宅地図：上記の空中写真および旧版地形図では、建物等の存在は認識できてもそれが何であるかを確定できないが、民間が発行している住宅地図は事業所等の名称も記載されているため、過去の土地利用履歴を調べる上で重要な情報源である。ただし、最新版以外は販売されていないため、図書館等で調査する。
- ・有害物質使用施設に関する台帳：他の根拠から対象地域における重金属等が自然由来であることが明確な場合には、シアンを除く第二種特定有害物質について、対象地域の重金属等の由来が不明な場合には、全特定有害物質についての資料を収集する。
- ・特定有害物質の漏洩記録：各自治体の環境部局や工場等の事業者などが所有する。
- ・登記簿謄本：事業所が立地していた場合に業種などを把握することに役立つことがあるので必要に応じて収集する。

なお、埋立や盛土による人工改変地については、対象地域周辺の自然地盤と性状が異なる可能性があることから、岩石・土壌の搬入元に関する資料についても収集する。特に、海洋汚染防止法の基準（資料集 1）に基づいて判定された岩石・土壌が搬入されている場合は、土壌汚染対策法の基準と異なることに留意する。

(9) 当該工事に関する資料収集

当該工事において、本調査の開始以前に既に調査、設計、施工等が行われている場合には、それらに関する報告書および付随する図面類を収集し、上記(4)～(8)に関係する情報を整理する。

また、当該工事以外に、対象地域および周辺で行われた工事に関する調査、設計、施工等の報告書および付随する図面類が入手可能な場合には、併せて収集、整理する。

4.4 地質調査

地質調査では、対象地域に存在する地質の分布と構造を把握し、本マニュアルで対応が必要な岩石・土壌を特定するための資料収集を行う。

地質調査は施工前調査（さらに施工前概略調査と、施工前詳細調査に分けられる）と工事の施工中調査とに大きく分けられるが、工事の段階に合わせた調査を中心に行う。ただし、工事の規模が大きかつ長期間にわたる場合には、効率的に重金属等の溶出量等を把握するために、概略状況の把握から要対策地質の絞り込みまで、無駄が生じないように系統的な調査および試験を行う必要がある。

(1) 施工前概略調査

1) 調査の目的

施工前概略調査における地質調査は、工事実施（予定）区域内において対応が必要となる自然由来の重金属等を含有する地質の有無を確認すること、および対策実施（予定）区域および保全対象（予定）区域の構成地質の概略についても把握し、サイト概念モデルの構築に資することにある。

2) 調査方法

調査は現地踏査を基本とし、トンネルのような地下深部が工事対象（予定）区域となる場合には、必要に応じてボーリング調査、物理探査等を行う。

3) 調査内容

工事対象（予定）区域の調査

本調査では、資料等調査から推定される自然由来の重金属等を含有している可能性のある地質の分布と構造の把握に努める。

現地踏査は露頭調査により地質性状を確認するとともに、必要に応じて転石、河川や溪流の堆積物、土壌等についても観察、採取・分析することで、調査域内に産する地質をできる限り把握する。特に変質帯や鉱化帯、一部の海成泥岩等には自然由来の重金属等を含有している可能性が高いので留意する。岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験、スクリーニング試験、溶出試験等に用いる地質試料の採取もあわせて実施する（「4.6 試料採取」参照）。

必要に応じて薄片の顕微鏡観察やX線回折などによる鉱物分析を行う。把握された情報から工事対象（予定）区域の地質平面図、断面図を作成する。この地質平面図、断面図等から対応が必要となる地質とその分布・構造をとりまとめる。とりまとめにあたっては、試験結果も地質平面図や地質断面図等に示して参考とする。

対策実施（予定）区域および保全対象（予定）区域の調査

本調査では、地質の分布と構造の把握に努める。特に、「4.5 水文調査」の水理地質構造の推定に資する地質（たとえば高透水性を示すと推定される礫層や開口亀裂性の地質、難透水性を示すと推定される粘土層等）の性状や分布に着目して調査する。

サイト概念モデル構築のための調査

サイト概念モデルの構築には、工事対象（予定）区域と保全対象（予定）区域の間、対策実施（予定）区域と保全対象（予定）区域との間の曝露経路を考慮した地質の分布と構造の把握を行う必要がある。

(2) 施工前詳細調査

1) 調査の目的

施工前詳細調査における地質調査の目的は、スクリーニング試験および溶出試験の結果、工事実施（予定）区域において自然由来の重金属等の問題が生じる懸念がある場合に、リスク評価、対策の選定・設計・施工に必要な資料を得ることにある。

2) 調査方法および調査内容

調査方法、調査内容は、施工前概略調査における調査方法、調査内容とほぼ同様であるが、要対策土量等を正確に把握するために、調査範囲を絞って、さらに詳細な調査を行う。この段階における試料採取は、施工前概略調査に加えて、詳しく調査をすべき地質毎に、判断に必要な頻度で実施する。

(3) 施工中調査

1) 調査の目的

施工中調査における地質調査の目的は、工事実施区域において、施工地点および近日中に施工される地点で、管

理や対策が必要な岩石・土壌を特定するとともに、対象となる地質の分布・構造の詳細を把握することにある。また、地質状況が施工前調査の結果と異なることが判明した場合に、地質の詳細把握や対策の要否を判定する目的で行う。

2) 調査方法および内容

施工中に出現したのり面、切羽等、および施工中に行われるボーリング等によって得られる地質試料の観察を行い、地質の判定を行う。試料採取は、試料の代表性を考慮して1日に複数回（点）行い、これらを均質に混合して1試料とし分析する。ただし、施工前詳細調査までの調査に基づいて予測したものと異なる地質が出現した場合は、必要に応じてそれまでの試料と混合せず、別途、分析する。

なお、施工中に施工前の調査時と異なる性状の地質が確認された場合は、地質の観察ならびに必要に応じて顕微鏡観察やX線回折などによる鉱物分析により地質を判定し、必要に応じてスクリーニング試験および溶出試験を実施する。

4.5 水文調査

水文調査は、対象地域に存在する表流水および地下水の流況、水質、水利用の状況を把握し、リスク評価、対策の設計、モニタリング計画の立案等に必要な資料収集を行う。

水文調査は、施工前調査と施工中および施工後調査に分けられるが、工事の段階に合わせた調査を中心に行う。ただし、工事の規模が大きいかつ長期間にわたる場合には、効率的に調査を行うために、バックグラウンドの把握から施工影響の把握まで無駄が生じないよう系統的な調査および試験を行う必要がある。水文調査の施工中および施工後調査はモニタリング（第7章）と一体として実施する。

(1) 施工前調査

施工前段階の水文調査の目的は、水を介して移動する自然由来の重金属等の工事対象（予定）区域から保全対象（予定）区域まで、または対策実施（予定）区域から保全対象（予定）区域までの移動経路の推定に資する資料を得ること、対象地域周辺の自然由来の重金属等の地下水および表流水のバックグラウンド値に関する資料を得ること、サイト概念モデルの構築に資する資料を得ることにある。

1) 調査方法

表流水、地下水および湧水の特性については現地調査を基本とし、既存井戸を用いた地下水調査、必要に応じてボーリングによる地下水調査を行う。水利用の状況は現地調査、関係者へのヒアリングによって調査する。

2) 調査内容

表流水の特性

対象地域および周辺地域について資料等調査によって推定された表流水の流域区分を現地にて確認するとともに伏流区間を現地にて確認する。確認された流域の面積を算出する。また、流域の主要地点での流量を観測し、季節変化、年変化を把握する。また、必要に応じて表流水のバックグラウンド値を把握するための必要な試料を得るために採水を行う。

地下水の特性

地下水特性の調査は、既存井戸、既存ボーリングを用いて行うが、必要に応じてボーリング調査を実施する。調査する地下水特性は、水位、流向、流速である。また、必要に応じて地下水のバックグラウンド値を把握するために必要な試料を得るために採水を行う。

湧水の特性

対象地域および周辺地域について湧水地点の現地調査を行う。各湧水地点では、地点の地形、構成地質・地質構造、流量（季節変化、降雨との関係）を調査し、湧水のメカニズムの推定を行う。また、必要に応じて湧水のバックグラウンド値を把握するために必要な試料を得るために採水を行う。

水利用状況の調査

表流水の農業用水等としての利用、地下水の飲用等の利用について現地調査を行うとともに、関係者にヒアリングを行って、現地調査の補足をする。

3) 水理地質構造の推定

表流水、地下水および湧水の特性と地質調査の結果判明した構成地質の分布・構造とを勘案して、対象地域周辺の帯水構造（地下水構造）等の水理地質構造を推定し、断面図等に表現し、サイト概念モデルの構築に資する資料とする。

分析項目等は「第7章 モニタリング」を参照のこと。

(2) 施工中および施工後調査

施工中および施工後の水文調査の目的は、自然由来の重金属等のモニタリングに資する資料を得ることにある。詳細は、「第7章 モニタリング」を参照のこと。

4.6 試料の採取

地質試料の採取は、スクリーニング試験、溶出試験等を適切に実施できるように行う。一方、水質試料の採取は、地下水のバックグラウンド値等を求めるための試験、工事の影響および対策の効果を把握するための試験を適切に実施できるように行う。

(1) 地質試料の採取

ここでいう地質試料とは、岩石・土壌試料のことである。地質試料の採取は、目的に応じて適切に行う。

地質試料の採取は、露頭、ボーリングコア、工事施工箇所ののり面・切羽、掘削ずりなどから適宜行う。採取する地質試料の量は、試料内のばらつきを少なくするために、数 kg 以上とする。ただし、ボーリングコアなど、採取量が限られる場合は、コアの保存なども考慮し、適切な量とする。採取した地質試料は酸化を防ぐために密閉できる容器か袋に保存し、できるだけ空気との接触を避けるようにする。特に細粒の黄鉄鉱などの硫化鉱物が含まれている場合には、酸化防止のための細心の留意を払う。

1) スクリーニング試験に用いる地質試料の採取

試料採取は対象地域の構成地質のすべてを網羅するように行い、同一の構成地質について、自然由来重金属等の全含有量のばらつきを把握するため、同一構成地質毎に、空間的に偏りのないように複数点の地質試料を採取する。同一構成地質であっても、粒度および鉱物組成が異なるもの、風化および変質の程度が異なるものが対象地域に存在する場合には、必要に応じて粒度ごと、鉱物組成ごと、風化および変質の程度ごとに地質試料を採取する。さらに、同一構成地質で粒度、鉱物組成、風化程度、変質程度が同じもののなかでのばらつきをみるために、同一の粒度などの試料について2試料以上の採取を行う。スクリーニング試験用試料の採取は、施工前段階では、地質調査時に岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値を求めるための地質試料採取と併用して行うと効率的である。

2) 岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験に用いる地質試料の採取

対象地域周辺でどの地域がバックグラウンドとなるかは、以降の溶出試験などを行って対象地域周辺における自然由来の重金属等の特性に関する全体像を明らかにする必要があるが、施工前段階では資料等調査および地質調査の結果からバックグラウンドとなる構成地質を選定し、その構成地質について自然由来重金属等の全含有量のばらつきを把握するために複数地点から地質試料の採取を行う。岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値を求めるための試験に用いる地質試料の採取は、スクリーニング試験用の地質試料採取と兼ねることが効率的である。

3) 溶出試験に用いる地質試料の採取

溶出試験に用いる試料の採取は、スクリーニング試験の結果、基準値を超えた構成地質を中心に行う。該当する構成地質における自然由来重金属等の溶出量のばらつきを把握するため、複数の地質試料を採取する。複数試料の採取の考え方は、スクリーニング試験に用いる地質試料の採取と同じである。

4) その他の試験に用いる地質試料の採取

その他の試験としては、構成地質の岩石記載学的な試験（薄片の顕微鏡観察）、鉱物分析、化学分析、透水試験などがある。これらの試験の結果は、上記の3種類の試験と関連づけることが肝要であり、上記3種類の試験に用いた地質試料の一部を縮分、分割などして試験に供する。

(2) 水質試料の採取

水質試料の採取は、目的に応じて適切に行う。

1) 地下水および表流水のバックグラウンド値を求めるための試験に用いる水質試料の採取

地下水および表流水のバックグラウンド値を求めるための試験に用いる水質試料の採取は、資料等調査および水文調査の結果から水に関するバックグラウンドとなっていると推定される箇所から行う。

2) 工事の影響および対策の効果を把握するための試験に用いる水質試料の採取

工事の影響および対策の効果を把握するための試験、いわゆるモニタリングのための水質試料は、それぞれ適切な箇所から採取する。

4.7 地質試料の調製

自然由来の重金属等のスクリーニング試験、溶出試験等に供するために、採取した地質試料について乾燥、粉碎、ふるい分け、縮分を行い、各試験に必要な粒径および量の地質試料を調製する。

自然由来の重金属等のスクリーニング試験、岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値を把握するための試験、溶出試験、および直接摂取リスクを把握するための試験に供するために、以下の手順を基本として地質試料の調製を行う。なお、いずれの工程においても異なる地質試料間の混合や器具からの汚染がないように細心の注意を払う。また、試料の酸化により重金属等の溶出特性が変化する場合があるため、各工程における保管等の試料の取り扱いに留意する。

代表試料の採取、粉碎、縮分の一般的な方法や留意事項については、JIS M 8100「粉塊混合物 - サンプリング方法通則」あるいは JIS Z 8815「ふるい分け試験方法通則」等を参考とする。

(1) 粗粉碎

採取した代表試料の全量をハンマーやインペラブレーカー、ジョークラッシャー等の粗碎機、鉄乳鉢などを用いて粗粉碎する。粉碎に用いる器具等は試料の硬軟や目標粒径を勘案して適切なものを用いる。このとき、試料の偏りが生じることを避けるため、採取した代表試料の全量を対象として粉碎する。なお、土壌や軟質な岩石で直接 2mm 以下まで粉碎を行うことが容易な場合は、この粗粉碎は省略できることもある。

粉碎の目標粒径は粉碎に用いる機器等に応じて適切に設定する。目標粒径は次の工程の縮分作業を効果的に行うためにはできるだけ小さい方がよいが、粉碎作業の効率を考慮して一般的には 5mm ~ 2cm 程度としている。目標粒径に応じた非金属製ふるいを用いてふるい分けと破碎を繰り返し、全ての試料を目標粒径以下に調整する。

器具等からの鉄分の混入が懸念されるので、鉄分混入をできるだけ避けるよう丁寧に作業を進めることが重要であり、可能であればクラッシャー等の破碎部がタングステンカーバイド等の鋼製以外の材質のものを用いる。

(2) 乾燥

粗粉碎した試料は微粉碎と縮分に支障とならない程度まで風乾する。このとき、過剰な乾燥を行うと試料の酸化が進行し、重金属等の溶出特性が変化する場合があるため、留意が必要である。

(3) 粗粉碎試料の縮分

粗粉碎した乾燥試料を縮分し、代表試料とする。代表試料の量は、試料の代表性の確保の点では多いほどよいが、微粉碎の効率の点では少ない方がよい。両者を勘案して数 100g ~ 1kg とすることが一般的である。縮分は試料の状態や設備の状況等に応じて最も効果的な方法を選択する。一般的には四分法が用いられるが、試料の粒径が小さく流動性が高い場合には、二分割器を使用することも可能である。

(4) 微粉碎

分取した代表試料を、試料全量が 2mm 以下の粒径になるまで粉碎とふるい分け（非金属製ふるいを用いる）を繰り返す。なお、自然由来の重金属等を対象とした試験を行う場合には岩石試料も 2mm 以下に粉碎することから、土壌試料であっても異物、木片を除去したのち 2mm 以下まで粉碎することとする。

微粉碎においては粉碎しやすいものとしにくいもので粒度分布に偏りが生じるので、ある程度粉碎したらふるい分けを行いながら 2mm 以上のものを再度粉碎するようにし、分析試料ごとに粒度の偏りがないようにする。2mm 以下の粒度分布の違いによって溶出量等に大きな違いがあり、試料ごとの粉碎条件をそろえる必要がある場合には、より小さな目開きのふるいによるふるい分けを行って粒度調整を行うことも考えられる。

粉碎には鋼製の乳鉢等を用いることが多いが、作業の効率性を考慮しスタンプミルやブラウンミルなどの機器を用いてもよい。

(5) 微粉碎試料の縮分

微粉碎した試料を縮分し分析試料とする。縮分は試料の状態や設備の状況等に応じて最も効果的な方法を選択する。四分法もしくは二分割器を使用した方法が一般的である。

(6) 試料の保管

試料の酸化・還元状態によって、試験結果が異なるので、試料は採取後できるだけ速やかに試料調製を行い分析に供することが望ましい。なお試料を長期間保管する場合は必要に応じて次のような措置を講じるとよい。

- ・低温保管（冷蔵もしくは冷凍）
- ・酸素遮断フィルムに脱酸素剤と共に脱気封入

また、水銀を含む可能性のある試料については、加温や減圧することで水銀が気化する可能性があるので、保管方法に留意する。

4.8 スクリーニング試験および岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験

4.8.1 スクリーニング試験および岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験の概要

自然由来の重金属等についての溶出試験の実施の要否を判定するためにスクリーニング試験を行う。スクリーニング試験は、地質試料中の自然由来の重金属等の全含有量試験による。岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値も全含有量試験で求める。

(1) スクリーニング試験

溶出試験の実施には時間を要するため、溶出試験に供する試料をあらかじめスクリーニングしておくことが、自然由来の重金属等に関するその後の評価を適切に行う上で必要である。そこで、スクリーニング試験として地質試料中の自然由来重金属等の全含有量を測定する試験を取り上げる。なお、ここでいう全含有量とは、地質試料に含まれる重金属等の全量であり、環境省告示第19号「土壌含有量調査に係る測定方法を定める件」の「土壌含有量」とは異なる。

自然の岩石・土壌には微量のカドミウム、クロム、水銀、セレン、鉛、ヒ素、フッ素、ほう素が含まれている。従って、通常の範囲で含まれているこれらの重金属等の全含有量は、問題ないものとして扱うことができると考えられる。全含有量に関する基準値は、「4.8.3 スクリーニング試験結果の評価」で述べる。

なお、基準値を超過して重金属等を含有することが明らかな場合、もしくは工事が小規模で工事で排出される土量がそれほど多くない場合、スクリーニング試験を省略し、「4.9.2 短期溶出試験」および「4.10 直接摂取のリスクを把握するための試験」をスクリーニング試験の代わりに実施することができる。

(2) 岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験

自然由来重金属等の岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値は、岩石・土壌中における全含有量である。したがって、スクリーニング試験の全含有量試験と同じ方法で求める。バックグラウンド値試験用の地質試料は、スクリーニング試験用の地質試料と同一としてもよい。

掘削された岩石・土壌を盛土として利用する予定がある場合は、必要に応じてその工事予定区域周辺においてもバックグラウンド試験を実施し、一体区域への埋戻し対策が適用可能かどうか検討する。

4.8.2 全含有量試験

全含有量試験は、地質試料に含まれる自然由来の重金属等のうち、カドミウム、総クロム、総水銀、セレン、鉛、ひ素、ふっ素、およびほう素の全含有量を、湿式分析法あるいは蛍光 X 線分析法によって測定する。

(1) 調査の段階と分析元素の選定

「2.2 自然由来の重金属等の分布」で述べたとおり、自然由来の重金属等の分布には地質的な特徴があることから、対象地域の地質的特徴に基づき、ある程度、試験対象とする元素を絞り込むことが可能である。以下に、調査の各段階における自然由来重金属等の分析元素の選定について述べる。

1) 施工前概略調査

施工前概略調査においては、地域の自然由来重金属等の分布の概要を把握することが目的であるので、自然由来重金属等のすべての元素を試験対象とする。

2) 施工前詳細調査

施工前概略調査の結果によって、試験対象とする元素を絞り込む。すなわち、施工前概略調査の時点でスクリーニング基準値を超過している元素については、引き続き、試験対象とする。または、次に示す元素ごとの観点から試験対象とする元素を絞り込む（表 4.8.1）。

カドミウム、セレン、鉛およびひ素

カドミウム、セレン、鉛およびひ素については様々な地質に含まれていることが知られているため、スクリーニング試験および岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験においては全ての場合に分析を行う。

分析方法については湿式分析法、蛍光 X 線分析法が適用可能であるが、蛍光 X 線分析法を用いる場合は、機器の検出限界に留意する必要がある。

総クロム

総クロムは、自然由来の六価クロムが蛇紋岩地域に特異的に存在することから、対象地域が蛇紋岩を含む超塩基性岩地域である場合、またはクロムを産出した鉱山が対象地域やその近傍に分布する場合、ならびに対象地域の地質がクロムを産出した鉱山と同じ場合に分析を行う。

分析方法については湿式分析法、蛍光 X 線分析法の双方が適用可能である。

なお、全含有量試験では六価クロムの含有量を把握することができないため、高濃度の総クロムの存在が明らかになった場合は、引き続き行われる溶出試験において、六価クロムの分析を行う必要がある。

総水銀

総水銀については、通常の岩石・土壌においてはほとんど存在しないことから、水銀鉱山、硫黄鉱山、その他金属鉱山および水銀、ひ素、ふっ素、ほう素を含む温泉が対象地域やその近傍に分布する場合、対象地域の地質がこれらの鉱山が分布する地質と同じ場合、および周辺地域で自然由来の水銀の検出事例が存在する場合に分析を行う。

分析方法については湿式分析法、蛍光 X 線分析法が適用可能であるが、蛍光 X 線分析法を用いる場合は、機器の検出限界に留意する必要がある。

ふっ素

ふっ素については、花こう岩類や海成堆積物起源の地質、熱水変質を受けた地質などに含まれるが、後述の基準値（表 4.8.7）を考慮すると、花こう岩類の地質および水銀、ひ素、ふっ素、ほう素を含む温泉が対象地域やその近傍に分布する場合、対象地域の地質がこれらの温泉が分布する地質と同じ場合に分析を行う。

分析方法については湿式分析法および波長分散型蛍光 X 線分析装置を用いた蛍光 X 線分析法が適用可能である。

ほう素

ほう素については、海成堆積物起源の地質や熱水変質を受けた地質などに含まれるため、海成堆積物起源の地質および水銀、ひ素、ふっ素、ほう素を含む温泉が対象地域やその近傍に分布する場合、対象地域の地質がこれらの鉱山が分布する地質と同じ場合に分析を行う。

分析方法については湿式分析法による。ただし、試料中のほう素全含有量が大きい場合は波長分散型蛍光 X 線分析装置を用いた蛍光 X 線分析法が適用可能な場合がある。

表 4.8.1 対象となる分析項目とその適用

分析項目	適 用	分析における留意点
カドミウム	全ての場合に分析を行う。	分析に蛍光X線分析法を用いる場合は、検出限界に留意する。
総クロム	超塩基性岩*や、クロムを産出した鉱山が対象地域もしくはその近傍に分布する場合に分析を行う。	蛇紋岩などの高濃度でクロムが存在する地質の存在が明らかになった場合、溶出試験においてクロム()の分析を行う。
総水銀	水銀鉱山、硫黄鉱山、その他金属鉱山および水銀、ひ素、ふっ素、ほう素を含む温泉が対象地域もしくはその近傍に分布する場合、および周辺地域で自然由来の水銀の検出事例が存在する場合に分析を行う。	分析に蛍光X線分析法を用いる場合は、検出限界に留意する。
セレン	全ての場合に分析を行う。	分析に蛍光X線分析法を用いる場合は、検出限界に留意する。
鉛	全ての場合に分析を行う。	
ひ素	全ての場合に分析を行う。	
ふっ素	花こう岩類の地質や水銀、ひ素、ふっ素、ほう素を含む温泉が対象地域もしくはその近傍に分布する場合に分析を行う。	分析は、湿式分析法または波長分散型蛍光X線分析装置を用いた蛍光X線分析法による。
ほう素	海成堆積物起源の地質や水銀、ひ素、ふっ素、ほう素を含む温泉が対象地域もしくはその近傍に分布する場合に分析を行う。	分析は、湿式分析法による。ただし、波長分散型蛍光X線分析装置で分析可能な場合あり。

*超塩基性岩：SiO₂含有量が45wt%より低い火成岩をいう。かんらん岩、蛇紋岩など。

3) 施工中調査

施工中調査において全含有量試験を実施する必要がある場合は、工事工程上の制約が考えられるので、蛍光X線分析法を用いるか、「4.13 迅速判定試験」の間接法を用いる。特に、カドミウム全含有量と亜鉛全含有量との間、水銀全含有量とひ素全含有量との間、およびセレン全含有量とひ素全含有量との間には相関性が認められることから、これらの関係から対象元素の全含有量を間接的に知ることができる。したがって、施工前調査において対象地域について、各元素の全含有量の相関を把握しておくことが有用である。

(2) 湿式分析法

底質調査方法（昭和63年9月環水管第127号）および土壤環境分析法¹⁾により、分析目的の元素ごとに適切な方法を用いて分析を行う。

試料については「4.7 地質試料の調製」に従った縮分済みの微粉碎試料を微粉化して分析に供し、分解操作において残渣が少なくなるよう配慮する。なお分析が正確に行われた場合、湿式分析法による値は、後述の蛍光X線分析法による値と同じか、それより小さくなる。

1) 底質調査方法（昭和63年9月環水管第127号）

本法には、底質中の各元素の分析方法が記述されている。なお、ふっ素、ほう素の分析方法は改訂案（2001年）に追記されている。表 4.8.2 は、各元素の底質調査方法による検出下限値およびスクリーニング基準値（「4.8.3 スクリーニング試験結果の評価」参照）を示したものである。また、目的元素ごとの試料の分解方法は表 4.8.3 の通りである。

なお、カドミウムおよびセレンについては、スクリーニング基準値が検出下限値付近あるいは検出下限値以下に設定されていることから、検出された場合には、スクリーニング基準値を超過しているものとみなす。

表 4.8.2 底質調査方法による各元素の検出下限値

	カドミウム	総クロム	クロム()	総水銀	セレン	鉛	ひ素	ふっ素	ほう素
検出下限値(mg/kg)	0.1	5	0.5	0.01	0.2	0.5	0.2	20	0.5
スクリーニング基準値(mg/kg)	0.15	65	-	0.05	0.1	23	9	625	10

表 4.8.3 底質調査方法による試料の元素別分解方法

	試料の分解方法
カドミウム	硝酸・塩酸・過塩素酸分解法、あるいは圧力容器法(硝酸・塩酸)
総クロム	炭酸ナトリウム融解法、あるいは硝酸・過塩素酸・ふっ化水素酸分解法、もしくは圧力容器法(硝酸・ふっ化水素酸)
総水銀	硝酸・過マンガン酸カリウム還流分解法、あるいは硝酸・硫酸・過マンガン酸カリウム分解法、もしくは硝酸・塩化ナトリウム分解法
セレン	硝酸・硫酸・過塩素酸分解法
鉛	硝酸・塩酸・過塩素酸分解法、あるいは圧力容器法
ひ素	硝酸・硫酸・過塩素酸分解法
ふっ素	過塩素酸酸性下で水蒸気蒸留
ほう素	炭酸ナトリウム融解法、あるいは硝酸・塩酸・ふっ化水素酸分解法、もしくは圧力容器法(硝酸・塩酸・ふっ化水素酸)

2) 土壌環境分析法¹⁾

本法には、土壌中の各元素の分析方法が記述されている。ただし、ふっ素、ほう素の全含有量分析方法については示されていない。目的元素ごとの試料の分解方法は表 4.8.4 の通りである。

表 4.8.4 土壌環境分析法による試料の元素別分解方法

	試料の分解方法
カドミウム	過塩素酸分解法
総クロム	アルカリ融解法、あるいは過塩素酸分解法、もしくはふっ化水素酸分解法
総水銀	加熱気化、または硫酸・硝酸・過マンガン酸カリウムで加熱分解後、塩化第一すずにより還元気化
セレン	ふっ化水素酸分解法、あるいは硝酸・過塩素酸分解法
鉛	過塩素酸分解法
ひ素	硫酸・硝酸・過塩素酸分解法
ふっ素	-
ほう素	-

(3) 蛍光 X 線分析法

1) 蛍光 X 線分析法の概要

蛍光 X 線分析法は、固体のまま試料の元素分析が可能な方法であり、簡易、迅速に分析が可能であることが特色である。しかしながら、**資料集 5** のように「4.8.3 スクリーニング試験結果の評価」で述べるスクリーニング基準値と比較すると、定量下限値または検出限界がスクリーニング基準値未満の元素は限られていることに留意する必要がある。なお、定量下限値、検出限界や分析の正確さに関しては、機器の性能のみならず、測定条件（管電圧、管電流の選択や測定時間）、試験試料および標準試料の調製方法、試験試料と標準試料との組成の類似性、検量線の作成方法など、様々な要因の影響を受ける。従って、**資料集 5** の値はあくまで参考にとどめ、個別に検討されたい。

蛍光 X 線分析装置には卓上型のエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置と、実験室据付型のエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置・波長分散型蛍光 X 線分析装置がある。エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置では、ほう素およびふっ素の分析はできないが、波長分散型では可能な場合がある。

2) 卓上型のエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置による全含有量試験

卓上型のエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置は、現場でのスクリーニング試験に適している。スクリーニング基準値未満の精度で定量できるのは、総クロム、ひ素、鉛である。セレン、カドミウム、水銀が検出された場合には、スクリーニング基準値を超過しているとみなす。

岩石・土壌中のひ素と鉛の全含有量を高精度で求めるためには、JIS K0470「土砂類中の全ひ素および全鉛の定量—エネルギー分散方式蛍光 X 線分析法」に従って、「4.7 地質試料の調製」に従った縮分済みの微粉碎試料を微粉化し、日本分析化学会や産業技術総合研究所が配布している標準試料を用いて検量線法により定量分析する必要がある。

る。

3) 実験室据付型蛍光X線分析装置による全含有量試験

高出力X線管球を装備した実験室据付型蛍光X線分析装置を用いることにより、卓上型蛍光X線分析装置よりも高精度に各元素全含有量を求めることが可能である。波長分散型蛍光X線分析装置はふっ素、ほう素の分析も可能な場合がある。スクリーニング基準値未満の精度で定量できるのは、総クロム、ひ素、鉛である。また、波長分散型の装置を用いた場合、ふっ素も定量できる。セレン、カドミウム、水銀が検出された場合には、スクリーニング基準値を超過しているとみなす。波長分散型蛍光X線分析装置でほう素が検出された場合にも、スクリーニング基準値を超過しているとみなす。

試料調製法と検量線法による定量分析方法は JIS K0470 と同様であるが、JIS K0470 と同様の方法で試料を微粉碎した後、プレス器で試料をプレスして試料表面を平坦にし、検量線法により定量分析する²⁾。検量線作成用の標準試料には日本分析化学会や産業技術総合研究所が配布している標準試料を用い、これらをプレス器でプレスして表面を平坦にする必要がある。特に波長分散型蛍光X線分析装置による定量分析の場合には試料の平面性が重要となる。

【引用文献】

- 1) 土壤環境分析法編集委員会編(1997)：土壤環境分析法，博友社．
- 2) 丸茂克美・氏家亨・根本尚大・小野木有佳 (2007)：小型蛍光X線分析装置を用いた人為的鉛・硫黄土壤汚染と自然汚染の識別．X線分析の進歩，38，215-233．

4.8.3 スクリーニング試験結果の評価

スクリーニング試験の結果は、上部地殻の元素存在度等または対象地域周辺の岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値を基準値として評価する。

(1) 上部地殻の元素存在度等に基づく評価

表 4.8.5 は上部地殻における元素の存在度等を示したものである。表の値のうち「日本の地球化学図」^{*1} は日本全国の河川堆積物 3024 試料の分析値をまとめたものであり、ホームページにて全データが公開されている。そこで、我が国における岩石・土壌に含まれている自然由来重金属等の通常値（平均値）を、この「日本の地球化学図」の平均値とし、この平均値を基準値とする（**表 4.8.6**）。なお、セレン、ふっ素、ほう素の値は「日本の地球化学図」には示されていない。このため、これらの元素の基準値については、クラーク数^{*2} とする（**表 4.8.7**）。ただし、岩石・土壌中の元素が 100%溶解したとして土壌溶出量基準（土壌汚染対策法施行規則の別表第二の量）となる含有量を算定した値の方が大きい元素（セレン）は、この算定値を基準値とする。

カドミウム、セレンの基準値については現状の分析手法によって定量下限値ないしは検出下限値を下回ると考えられる値が設定されている。今後分析技術の進歩によっては基準値をもって判断することとなるが、現状においてはこれらの元素に関して検出下限値以下の値であれば基準を満足するものと見なさざるを得ないことから、基準値および検出下限値のいずれか大きいものを基準としておく。

なお、セレンの基準値の設定に適用した土壌溶出量基準から求める全含有量の算定方法は、次の通りである。

土壌溶出量を求める環境省告示第 18 号に基づく試験では、試料と溶媒の重量体積比を 10%とするので、例えば試料量 0.1kg に対して溶媒量は 1L となる。このとき、目的元素の溶液濃度が土壌溶出量基準と同一濃度となった場合を考える。試料中の目的元素がすべて溶媒中に溶解したとすると、試料中の目的元素の全含有量は次の式で求まる。

$$\text{全含有量の算定値(mg/kg)} = \text{土壌溶出量基準(mg/L)} \div 0.1(\text{kg}) \times 1(\text{L})$$

この全含有量の算定値より小さな全含有量の試料について重量体積比 10%の条件で溶出試験を実施した場合、理論的に必ず土壌溶出量基準を下回る。

*1 : 「日本の地球化学図」ではひ素や鉛などの濃度が高い地点があるが、これらは鉱山の影響であり、局所的なものである。「日本の地球化学図」の平均値を基準値とした場合でも、これらの鉛やひ素などの濃度データの影響は大きくない。

*2 : クラーク数：地球表層部の各元素の平均存在度。

表 4.8.5 上部地殻の元素存在度等 (単位: mg/kg)

		カドミウム	クロム	水銀	鉛	セレン	ひ素	ふっ素	ほう素	文献
大陸地殻の平均値		0.2	100	0.08	12.5	0.05	1.8	625	10	1)
クラーク数		0.2	100	0.08	13	0.05	1.8	625	10	2)
日本列島の上部地殻の平均値			84		16.9		6.5-7.1			3)
土壌の平均元素組成	平均	0.35	70	0.06	35	0.4	6	200	20	4)
	最大	2	1500	0.5	300	12	40	700	270	
	最小	0.01	5	0.01	2	0.01	0.1	20	2	
土壌の元素組成		0.295 ^{*3}	25.7 ^{*2}	0.06	17.2 ^{*3}	0.47 ^{*4}	6.82 ^{*2}	200	20	5) (出典 ^{*2} :6)、 ^{*3} :7)、 ^{*4} :久保田ほか(未発表)、その他:4))
日本の地球化学図	平均	0.158	65.2	0.054	23.1		9.32			8)
	中央値(メジアン)	0.13	53.1	0.040	20.7		8			
	標準偏差	0.1	45.4	0.0468	11.8		7.51			
	最小	0.017	3.34	<0.0010	4.07		<1			
	最大	28.9	1941	18.05	7594		2010			
自然的原因による含有量の上限値の目安 ^{*1}		1.4		1.4	140	2	39	700	100	環水土第 20 号別紙 1
土壌に含まれる特定有害物質の量		150	Cr ⁶⁺ 250	15	150	150	150	4000	4000	土壌汚染対策法 施行規則別表第三

*1:全国主要 10 都市で採取した市街地の土壌中の含有量の平均値+3σ

表 4.8.6 スクリーニング基準値 (1)(単位: mg/kg)

	カドミウム	クロム	水銀	鉛	ひ素
日本の地球化学図による平均値(ppm)	0.158	65.2	0.054	23.1	9.32
土壌溶出量基準(mg/L)	0.01	0.05	0.0005	0.01	0.01
土壌溶出量基準から算定した値(mg/kg)	0.1	0.5	0.005	0.1	0.1
スクリーニング基準値(mg/kg)	0.15	65	0.05	23	9

表 4.8.7 スクリーニング基準値 (2)(単位: mg/kg)

	セレン	ふっ素	ほう素
クラーク数	0.05	625	10
土壌溶出量基準(mg/L)	0.01	0.8	1
土壌溶出量基準から算定した値(mg/kg)	0.1	8	10
スクリーニング基準値(mg/kg)	0.1	625	10

(2) 対象地域周辺の岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値に基づく評価

既述の「(1) 地殻の元素存在度等に基づく評価」は、日本および世界の上部地殻の元素存在度等に基づく基準であるため、日本国内における自然由来重金属等の地域特性を反映していない。日本国内では、さまざまな構成地質によって、自然由来重金属等の全含有量もさまざまな値を示している。そこで、特にある重金属等に関して「地殻の元素存在度に基づく評価」によって定められたスクリーニング基準値を超えていても、その重金属等による健康被害が問題となっていない対象地域(一体区域)については、周辺の岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値を求め、その値をスクリーニングの基準値とすることも可能とする。その一体区域において、スクリーニング基準値を超え、全含有量バックグラウンド値以下の岩石・土壌については、一体区域内に搬出することができる(「6.1 対策の選定・設計」参照)。ただし、搬出する場合には、対象となる岩石・土壌の拡散および酸化を防止する観点から、覆土等の表面被覆を行うとともに、モニタリングを実施する。

なお、対象地域周辺の岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値を基準値とする際には、「日本の地球化学図」の当該地域の値(日本の地球化学図のホームページを参照)も参考にする。

【引用文献】

- 1) Taylor, S.R. (1964): The abundance of chemical elements in the continental crust-a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, 1273-1285.
- 2) Mason, B. (1966): *Principles of Geochemistry*, 3rd ed., Wiley, 329p.
- 3) Togashi, S., Imai, N., Okuyama-Kusunose, Y., Tanaka, T., Okai, T., Koma, T. and Murata, Y. (2000): Young upper crustal chemical composition of orogenic Japan Arc. *Geochemistry Geophysics and Geosystem*, 1, Paper No. 2000GC000083.
- 4) Bowen, H. J. M (1979): *Environmental Chemistry of the Elements*. Academic Press, 333p.
- 5) 浅見輝男(2001): データで示す - 日本土壌の有害金属汚染. アグネ技術センター, 402p.
- 6) 日本土壌協会(1984): 土壌汚染環境基準設定調査 - カドミウム等重金属自然賦存量調査解析 (昭和 59 年 3 月) - . 211p.
- 7) 浅見輝男・久保田正亜・南沢究(1988): 土壌中のカドミウム, アンチモン, ビスマスなどの重金属元素の自然界値. *日本土壌肥料学雑誌*, 59, 197-199.
- 8) 今井登ほか(2004): 日本の地球科学図. 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 209p.
日本の地球化学図ホームページ: <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/geochemmap/setumei/setumei-heikin.htm>

4.9 溶出試験

4.9.1 溶出試験の概要

溶出試験として、短期溶出試験、酸性化可能性試験および実現象再現溶出試験を必要に応じて行う。

溶出試験として、短期溶出試験、酸性化可能性試験および実現象再現溶出試験を必要に応じて行うが、それらは図 4.9.1 に示す流れに沿って実施する。ただし、溶出試験の順は、必ずしもこの流れに沿う必要はなく、前の段階の溶出試験をとばして、次の段階の試験を行っても良い。たとえば、実現象再現溶出試験によって評価を行う方針の場合は、調査の初期より実現象再現溶出試験の検討を開始し実施する場合がある。

各溶出試験の結果に基づき、専門家の総合評価を行う。専門家の総合評価では、溶出試験結果に加えて対象となる岩石・土壌の特性を考慮し、自然由来の重金属等に関する更なる試験の実施や対策の必要性の有無を判断する。その内容は、評価対象となる溶出量を求める溶出試験方法が異なっているため、専門家の総合評価 1、2 および 3 で異なっている。専門家の総合評価 1、2 および 3 の具体的内容は、各試験法の項を参照されたい。なお、専門家の総合評価は評価結果を「リスクがある」、「リスクがない」の 2 段階に区分するとともに、評価理由についてとりまとめる。「リスクがある」に区分された場合には、それまでに得られた試験結果などを用いてリスク評価を実施するか否かを判断するか、次の段階の溶出試験を実施する。「リスクがない」に区分され、かつ土壌含有量基準を満たすものは、対策の不要な発生土として扱う。

なお、岩石・土壌中の自然由来の水銀については、金属水銀あるいは無機水銀の一種である硫化水銀の形を取ることが多いと考えられ、岩石・土壌中のアルキル水銀は人為由来である可能性が高い。ただし、水銀は環境中でアルキル化する可能性があることから、溶出試験において水銀が検出された場合はアルキル水銀が不検出であることを確認する。万一アルキル水銀が検出された場合は、人為的な汚染の有無について再検討を行い、自然由来であると考えられる場合は専門家と対応を検討する。

リスク評価は、「第 5 章 リスク評価」にしたがって行う。

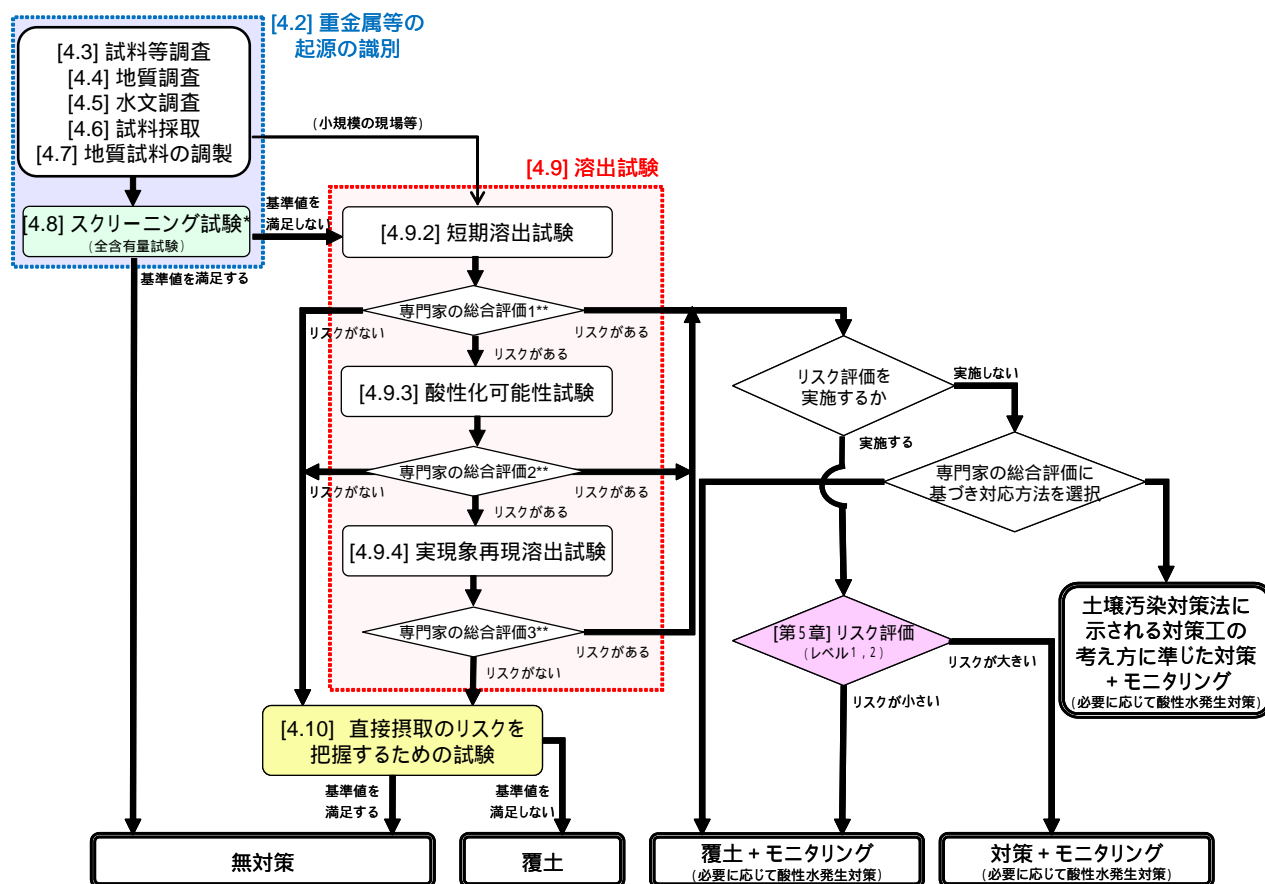


図 4.9.1 溶出試験の流れ (図 4.1.1 の再掲)

4.9.2 短期溶出試験

溶出試験方法の一つとして、短期溶出試験を行う。

(1) 本試験の位置づけ

人為由来の重金属等は、主として土壌粒子に吸着あるいは土壌中の間隙水中に溶解して存在しており、その溶出量は土壌の吸着に依存することから、環境省告示第 18 号に示される方法によって評価されている。

一方、自然由来重金属等は鉱物に取り込まれているものなど化学的に結合していることが多く、その溶出量は岩石と溶液の反応の程度によって変化すると考えられる。このため、環境省告示第 18 号に示される方法を参考に自然由来の重金属等の溶出量を測定した場合、2mm 以下の粒径に試料を粉砕すると比表面積が増加するため溶出量を多く見積もる可能性がある一方で、重金属等が化学結合していることから反応速度が遅く短時間の反応では溶出量を少なく見積もる可能性があり、この方法によって得られた溶出量のみをもって自然由来の重金属等の溶出による人の健康への影響を評価することは困難である。しかしながら、自然由来の重金属等の溶出現象を短時間で適切に評価しうる試験方法が存在しないこと、人の健康への影響について土壌環境基準に基づく評価が行われることが多いことなどから、自然由来の重金属等の溶出特性の評価方法の一つとして、環境省告示第 18 号に示される方法に変更を加えた試験（短期溶出試験）を取り上げることとした。また、本試験は、特に基準値を超過して重金属等を含有することが明らかな場合、もしくは工事が小規模で排出される土量がそれほど多くない場合、スクリーニング試験の代わりとして実施しても良いこととした。

なお、ここに示す試験方法は、試料として岩石・土壌を 2mm 以下のふるいを全量通過するまで粉砕したものをを用いる点において、環境省告示第 18 号に記載の試験方法とは異なるものである。

(2) 試験方法

試験方法は、原則として環境省告示第 18 号「土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件」に示されている環境庁告示第 46 号「土壌の汚染に係る環境基準について」の付表に掲げる方法に従う。

ただし、試料は、「4.7 地質試料の調製」に従い、2mm 以下のふるいを全量通過するまで粉砕したものをを用いる。

測定項目は、重金属等については調査の段階に応じて必要なものを測定する。このほか、検液の水素イオン濃度指数(pH)、電気伝導率(EC)、酸化還元電位 (ORP)、ナトリウムイオン濃度 (Na^+)、カルシウムイオン濃度 (Ca^{2+}) および硫酸イオン濃度 (SO_4^{2-}) を測定しておくこと、溶出特性の把握に利用可能である。また、必要に応じて残渣の鉱物組成の分析を実施する。

(3) 評価

試験結果から専門家の総合評価 1 を行う。専門家の総合評価 1 の結果は、「リスクがある」と「リスクがない」に区分する。専門家の総合評価 1 は発生源評価とサイト概念モデルを用いた評価に分けられる。

専門家の総合評価 1 の発生源評価に当たっては、まず、土壌溶出量基準を基準値として評価を行う。ただし、本試験の位置づけでも述べたように、自然由来の重金属等の溶出現象は試料の状態、反応時間等によって様々なケースがある。したがって本試験によって得られる溶出量が土壌溶出量基準を満足していても、地質試料からの自然由来の重金属等の溶出特性を考慮すると、直ちに安全と評価することはできない。逆に溶出量が土壌溶出量基準を超過していても、地質試料からの自然由来の重金属等の溶出特性を考慮すると、直ちに危険であると評価することはできない。発生源評価に当たっては、対象地域と同じ地質または類似地質に関するより詳細な溶出試験の結果（たとえば、実現象再現溶出試験の結果、溶出量の経時変化など）、当該重金属等の全含有量、地質試料の鉱物組成などとの比較を行う。たとえば、全含有量が著しく大きい、鉱物組成からみて高濃度の重金属等を溶出させる可能性がある、あるいは長期的な酸性水発生の懸念があるなどの場合には、「リスクがある」と判断される。一方、短期溶出量試験の結果、溶出量が土壌溶出量基準を満足し、なおかつ硫化鉱物の酸化に伴う長期的な重金属等の溶出や酸性化の懸念がない場合（たとえば非変質の花こう岩など）には、「リスクがない」と判断される。

専門家の総合評価 1 のサイト概念モデルを用いた評価を行うことができるのは、発生する岩石・土壌の利用場所とその後の管理方法が明らかな場合のみであることに留意する。サイト概念モデルを用いた評価に当たっては、サイト概念モデル（第 5 章）を構築し、発生源近傍で地下水飲用による人の健康への影響の可能性があるかどうか、定性的に評価する。「リスクがある」と判断される場合は、例えば、発生源評価において「リスクがある」と判断され、かつ、発生源より地下水の下流方向近傍に飲用井戸が存在する場合などが挙げられる。一方、発生源評価において「リスクがない」と判断される場合や、発生源における重金属等の溶出量が小さく、発生源近傍に飲用井戸が存在しない場合などは「リスクがない」と判断する。

専門家の総合評価Ⅰの結果、「リスクがない」と判断されかつ、土壌含有量基準を満たすものは、当該岩石・土壌を対策が不要な発生土として扱う。「リスクがある」と判断された場合には、リスク評価を実施するか否かを判断するか、酸性化可能性試験を実施する。

リスク評価は、「第5章 リスク評価」に従って行う。

4.9.3 酸性化可能性試験

酸性化可能性試験は自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌が空気や水分に曝され続けた場合の酸性化の程度を把握するために行う。

(1) 試験の目的

岩石・土壌に含まれる自然由来の重金属等は、建設工事により地下環境から地上環境へと移動させられ、空気、水分といった新たな外的要因により、その存在形態を変化させる。また、将来的に空気や水分に曝され続けた場合、溶出量の変化や含有される硫黄分の酸化によって生成する硫酸による酸性化が危惧される。このような変化を予測するために、過酸化水素水を用いて地質試料を強制的に酸化させ、溶液の pH の測定を行う。なお、本試験に類似の方法で溶液中に溶出した重金属等の濃度を測定する方法を資料集 7 に示す。

岩石・土壌には黄鉄鉱をはじめとする様々な硫化鉱物が含有されていることがある。このような硫化鉱物は、地下環境のような嫌気環境においては、極めて安定である。しかしながら、酸素と接触し酸化されることによって、溶出しやすい硫酸塩に変化することが知られている。この酸化反応は、酸素による酸化だけでなく、場合によっては鉄酸化細菌、硫黄酸化細菌といった微生物によっても促進される。このように酸化された場合、硫黄成分は硫酸イオンとなるため、岩石・土壌周辺の水環境は強く酸性化され、酸性水発生の原因となる。場合によっては、酸性水の発生に伴い岩石・土壌中の重金属等の溶出が促進される可能性があるため、留意が必要である。

(2) 試料調製および試験準備

地質試料は、乾燥させた後、粉碎し、2mm 目のふるいを全量通過させたものを用いる。

試料を酸化させる酸化剤として、過酸化水素溶液を使用する。通常 30% に調整されたものが販売されており、これに 10mmol/L の水酸化ナトリウムを加え pH を 6 に調整する。

過酸化水素水は、かなり激しく地質試料と反応するため、試験実施の際には、耐薬性の保護具の使用が不可欠であり、現場での簡易試験としては実施せず、整備された化学実験室において、ドラフトチャンバー 内にて、保護メガネ等の保護具を着用の上、試験を実施することを推奨する。

ドラフトチャンバー：有毒ガスなどの排気設備を備えた化学実験台

(3) 試験

試験は、「過酸化水素水を用いる pH 試験」¹⁾に従って実施する。本試験は激しく反応しガスを発生させるため、必ずドラフトチャンバー内にて混合、反応させる。また、極めて反応性の高い試料の場合、突沸して容器から溶液があふれることがあるので大きめの容器を用いる。

(4) 分析

分析項目は、検液の pH である。

pH は、pH メータを用いて測定する。

(5) 試験結果の評価

試験結果から専門家の総合評価 2 を行う。専門家の総合評価 2 の結果は、「リスクがある」と「リスクがない」に区分する。専門家の総合評価 2 は発生源評価とサイト概念モデルを用いた評価に分けられる。

専門家の総合評価 2 の発生源評価に当たっては、まず、検液の pH が 3.5 以下のものを、地質試料の長期的な酸性化の可能性があるものとして評価する。同一試料による本試験および土研式雨水曝露試験の結果を比較したところ、土研式雨水曝露試験の検液の pH が 5.8 (水質汚濁防止法に定める一般排水基準の最低値) を下回るものは全て本試験の検液の pH が 3.5 以下であった。特に土研式雨水曝露試験の開始から 2 年 8 ヶ月後に検液の pH が 5.8 を下回った試料について、本試験の検液の pH が 3.5 以下であった (資料集 9 (2) 参照) ことから、本評価方法が妥当なものであると考えることができる。専門家の総合評価 2 の発生源評価の結果、「リスクがない」と評価できる場合としては、例えば短期溶出試験の結果、基準値の超過が認められず、かつ長期的な酸性化の可能性がなく、さらに全含有量が著しく大きくない場合が挙げられる。

専門家の総合評価 2 のサイト概念モデルを用いた評価を行うことができるのは、発生する岩石・土壌の利用場所とその後の管理方法が明らかな場合のみであることに留意する。サイト概念モデルを用いた評価に当たっては、サイト概念モデル (第 5 章) を構築し、発生源近傍で地下水飲用による人の健康への影響の可能性があるかどうか、定性的に評価する。「リスクがある」と判断される場合は、例えば、発生源評価において「リスクがある」と判断さ

れ、かつ、発生源より地下水の下流方向近傍に飲用井戸が存在する場合などが挙げられる。一方、発生源評価において「リスクがない」と判断される場合や、発生源における重金属等の溶出量が小さく、発生源近傍に飲用井戸が存在しない場合などは「リスクがない」と判断されよう。

専門家の総合評価 2 の結果、「リスクがない」と判断されかつ、土壌含有量基準を満たすものは、当該岩石・土壌を対策が不要な発生土として扱う。「リスクがある」と判断された場合には、実現象再現溶出試験を行う、または定量的リスク評価を実施するか否かを判断する。

リスク評価は、「第 5 章 リスク評価」に従って行う。

【引用文献】

- 1) 地盤工学会「土質試験の方法と解説」改訂編集委員会編(2000): 土質試験の方法と解説(第一回改訂版). 地盤工学会, 164.

4.9.4 実現象再現溶出試験

実現象再現溶出試験は、岩石・土壌の性状、工事内容、水文環境等の条件により変化する自然由来の重金属等の溶出特性を把握するために行う。実現象再現溶出試験の試験方法や条件は、対象物質の溶出に関わる現場条件と影響因子を考慮して設定する。

(1) 試験の概要

専門家の総合評価 1 または 2 の結果、さらなる試験の実施が必要と判定された岩石・土壌の現場条件下における重金属等の溶出挙動を評価し、地下水等の摂取によるリスクの評価に資する試験結果を得ることを目的とする。試験の実施にあたっては、下記の 3 点を考慮する。

地域特性、事業特性、現場条件等に応じた試験方法を検討する。

岩石・土壌からの自然由来の重金属等の溶出は、岩石・土壌の性状、工事内容、水文環境等の影響を受けるので、溶出特性の態様は多様であると想定される。実現象再現溶出試験では現場条件を想定した上で、以下のような試験結果を得る。

- ・単位質量当たりの岩石・土壌からの重金属等の溶出量 (mg/kg)、ならびその経時変化
(溶出量 = 溶出濃度 (mg/L) × 溶出水量(L) ÷ 土砂質量 (kg))
- ・溶出率 (= 溶出量 (mg/kg) ÷ 全含有量 (mg/kg)) ならびにその経時変化

適用するリスク評価のレベル (詳細は「5.2 サイト概念モデルに基づく対応」を参照されたい) に応じて、実現象再現溶出試験において想定する現場条件の範囲が異なる。レベル 1 (標準モデル) を適用する場合には、試験の実施時に対策工の効果を見込まない。レベル 2 (詳細モデル) を適用する場合には、対策工の効果を見込んで試験を実施してもよい。

(2) 現場における溶出特性と試験条件の設定

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌から対象物質が溶出し移動 (移流・拡散) する状態は、その対象物質の種類・存在形態、降雨・地下水等の浸透状態、および化学環境の状況などにより表 4.9.1 のように分類される。本項で述べる実現象再現溶出試験では、掘削した岩石・土壌の溶出特性を把握することが主体となるため、表 4.9.1 に示す、☐、☐ の状態が検討の中心となる。盛土の内部や地盤中に掘削した岩石・土壌を埋める場合には ☐ の状態になることも考えられる。

表 4.9.1 場の条件と対象物質の溶出・移動

対象物質の溶出と移動の分類	左の溶出・移動挙動が生じる対象地層と場の条件		化学環境	該当する条件の現場 (例)
	対象地層	被覆の有無		
対象物質が溶出するが停滞	不飽和層	被覆あり (降水浸透無し)	好気性	盛土・埋土 (遮水構造あり)
対象物質が溶出して鉛直移動	不飽和層	被覆なし (降水浸透あり)	好気性	切土・盛土 (遮水構造なし)、ずり仮置き場
対象物質が地下水に溶存し移動	浅い～深い帯水層	被覆なし (降水浸透あり)	好気～嫌気性	盛土下部・埋土部 (遮水構造なし)
対象物質が地表水に流出	表層	被覆なし	好気性	トンネル切羽、ずり仮置き場

実現象再現溶出試験の方法と条件は、様々な地質の種類・物理性状、重金属等の種類・全含有量分布・化学形態を有する岩石・土壌が、どのような工事 (土地の形質変更) や対策の実施によって、どのような環境条件に置かれたとき、どのように溶出するのか (溶出量 = 溶出水量 × 濃度の経時変化) を模擬できるように設定することが重要である。重金属等の分布状態や化学形態によっても化学反応である溶出特性は様々であり、実現象再現溶出試験の方法と条件を決定するにあたっては、現場における溶出特性に影響を及ぼす岩石・土壌の性状と環境条件 (図 4.9.2) を予測しなければならない。中でも、試験条件を定める上で重金属等の溶出特性に比較的大きな影響を及ぼす現場条件には、下記の 4 点が考えられる。

試料粒度：細粒分が多いと比表面積が大きくなり溶出量が増加する可能性がある。

曝露水量：岩石・土壌への降水浸透量等が多いと総溶出量が増加する可能性がある。

乾湿繰返し：酸化反応と細粒化が促進され溶出性が高くなる可能性がある。

乾燥（湿潤）密度：盛土等において岩石・土壌の乾燥（湿潤）密度が低いと水と空気の浸透能が高くなるため溶出性が高くなる可能性がある。

これまでに行われている試験方法とその特徴を表 4.9.2 に示した。また、試料調製や溶出操作などの試験条件が溶出特性に及ぼす影響、ならびにこれらの試験条件を考慮する試験方法を表 4.9.3 に整理した。

表 4.9.2、表 4.9.3 に基づいて試験方法ならびに試験条件を決定する。

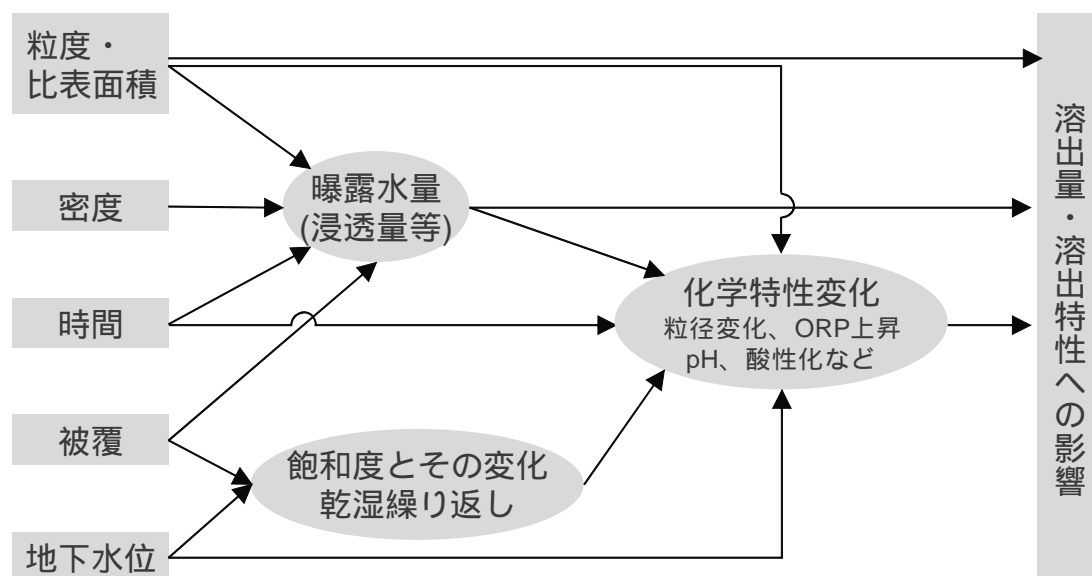


図 4.9.2 現場での溶出特性に影響を及ぼす岩石・土壌の性状と環境条件

表 4.9.2 試験方法の種類と特徴（実現象再現性）

試験方法		試料量	特徴				留意事項
			再現性	最大溶出量	溶出速度	長期溶出	
回分（バッチ）	繰返し溶出	約 100 g	良い	可能	ある程度可能	可能	操作容易
	pH 依存性	不定(5 ~ 50g)	良い	可能	困難	場合によっては可能	薬品注意、過酷化学条件溶出
	タンクリーチング（浸漬）	約 400g（有姿）	良い	可能な場合あり	ある程度可能	可能	操作容易、拡散溶出
連続（フローズル）	カラム	不定（30g ~ 20kg）	良い	可能	可能	可能	装置必要、密度・透水性と溶出量の関係把握
	ライシメーター	10kg 以上	不明	可能	可能	可能	装置必要、現場条件模擬、溶出量変化把握
	曝露試験 実大盛土	10kg 以上	不明	可能な場合あり	可能	可能	現場条件模擬、溶出量変化把握

表 4.9.3 溶出試験の試験条件と溶出特性に及ぼす影響、ならびに試験方法の適用

試験条件 (~ は影響大)	固相の単位質量あたりの溶出性 (短期溶出試験に対する相対評価)			試験方法 (試験条件の制御: 可能、不可×)			
	低い	短期溶出試験	高い	繰り返し溶出	タンクリンク	カラム・ライシメーター	曝露試験 実大盛土
粒度	大	-2mm	小				
試料・溶媒の比	小	1/10	大				×
乾湿繰り返し	小	(風乾)	大		×	×	
密度	大	—	小	×	×		
攪拌	小	200rpm	大			×	×
温度	小	常温	大				×
酸化還元電位	小	—	大			×	×
溶媒 pH (酸性)*	大	初期 5.8 ~ 6.3	-				×
溶媒 pH (塩基性)**	-	初期 5.8 ~ 6.3	大				×
時間	小	6 時間	大				

*溶媒 pH (酸性): 硫化鉱物を含む岩石・土壌は、硫化鉱物の酸化分解反応に伴い、硫酸を生成すると共に重金属等を溶出させることがある。このような岩石・土壌の溶出性を把握するため、酸性溶媒(硫酸)を用いた試験を行うことがある。

**溶媒 pH (塩基性): 水溶液中で陰イオンの形態を取る重金属等は、塩基性の溶液中で溶出しやすくなるがある。このような状況が想定される場合には塩基性溶媒を用いた試験を行うことがある。

参考として、比較的大きな影響を及ぼす現場条件と溶出量の関係を概念的に図 4.9.3 に示す。左図の攪拌の強弱による溶出量への影響は、バッチ試験において把握することが可能であり、右図の乾湿繰り返しによる溶出量への影響は、繰り返し溶出試験、カラム試験、ライシメーター試験、曝露試験において把握することが出来る。

また、岩石を粉砕した試料を用いて試験を行うと、一般に、実際の粒径より大きな溶出量を示すことから、土壌溶出量基準そのもので評価することは適切でない場合がある。大粒径の試料を用いた短期溶出試験の結果と通常の短期溶出試験の結果を用いて、短期溶出量試験結果の補正ができる場合があると考えられる。参考にその方法を資料集 6 に示す。

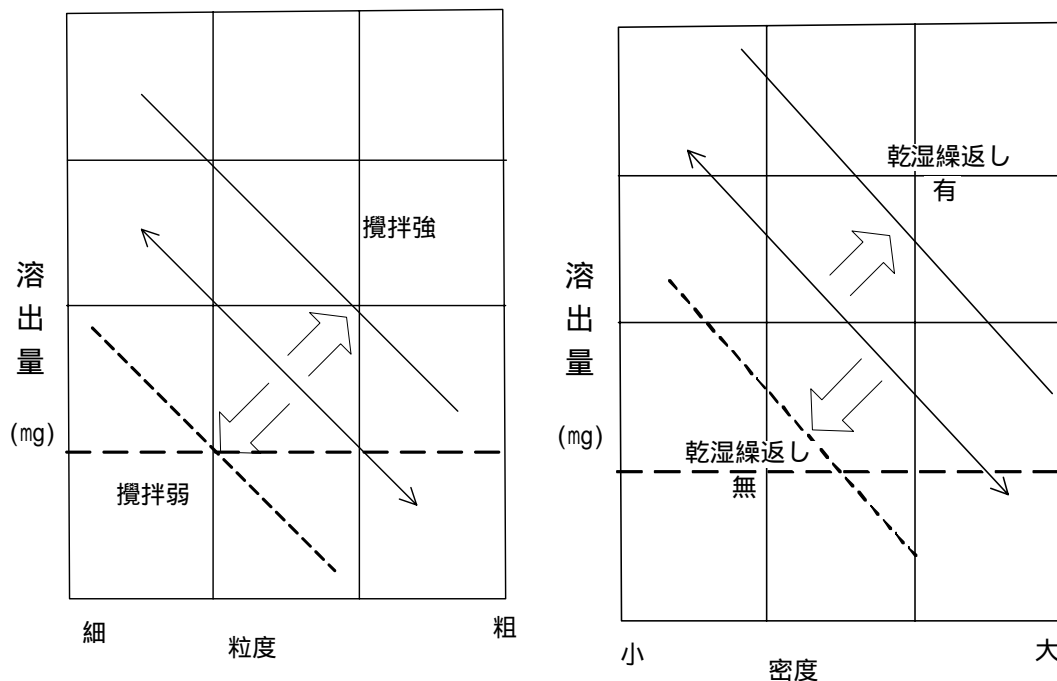


図 4.9.3 主要な試験条件と溶出量の関係(概念図)

(3) 試料調製と供試体作製

実現象再現溶出試験に供する試料は、他の試験試料と同じく代表性と均質性に十分配慮する必要がある。

バッチ試験に供する試料の調製（試料の縮分、粒度調整等）は「4.7 地質試料の調製」を参照し、さらに表 4.9.2 に示した目的別の各試験に供する試料の調製については目的に適した粒径に調整する。

カラム試験、ライシメーター試験、曝露試験に供する試料の採取は「4.6 試料の採取」、試料調製は「4.7 地質試料の調製」を参照とするが、カラム試験には乱さない試料採取を用いる場合もあるので、その場合の採取方法は地盤工学会規格(JGS1221～1224, 1231)を参照されたい。

なお、カラム試験、ライシメーター試験、曝露試験における岩石・土壌供試体の密度は、透水性と溶出特性に影響を及ぼすので、現場での条件を模擬できるように設定する。

(4) 試験方法

実現象再現溶出試験は、表 4.9.2 に示した試験方法の中から表 4.9.3 に示した現場条件と溶出特性の関係を参考に、目的に応じて適宜適切な方法を選択あるいは組み合わせて行う。具体的な試験方法は、資料集 9 を参照されたい。

(5) 測定項目

試験中の測定項目は、対象物質の溶出特性（溶出量、溶出率等）を把握するために試験に用いる試料の全含有量、および溶媒と溶出水の水質に関する下記の項目を目的に応じて選択して実施する。特に、溶出量の時間変化を把握するためのカラム試験、ライシメーター試験、曝露試験においては対象物質の濃度とその他の必須項目との相関性、影響を把握できるような測定が重要である。

全含有量：対象物質の溶出率の算定に必要（「4.8.2 全含有量試験」の結果を利用）

溶媒と溶出水の水質：対象物質の溶出量とその速度および溶出率の算定に必要

必須項目：水温、pH、電気伝導率、溶出水量、対象物質の濃度

選択項目：溶存イオン濃度、酸化還元電位、対象物質以外の濃度

(6) 結果の整理と利用

試験結果から専門家の総合評価 3 を行う。専門家の総合評価 3 の結果は、「リスクがある」と「リスクがない」に区分する。専門家の総合評価 3 は発生源評価とサイト概念モデルを用いた評価に分けられる。

「リスクがある」と評価された場合には、リスク評価を実施するか否かを判断する。「リスクがない」と評価され、かつ、土壌含有量基準を満たすものを対策が不要な発生土として扱う。

専門家の総合評価 3 の発生源評価に当たっては、まず、溶出時間ないしは溶出水量と溶出濃度、溶出量、溶出率等との関係を、たとえば図 4.9.4 に示すように整理する。図 4.9.4 の E や G は初期溶出濃度が基準値未満でも積算溶出量が許容摂取量を越える場合、図 4.9.4 の B や C は初期溶出濃度が基準値超過でも積算溶出量が許容溶出量を越えない場合であり、前者はリスクがあり、後者はリスクが無いと評価される事例である。専門家の総合評価 3 は、表 4.9.4 に示すように、想定期間中の岩石・土壌からの重金属等の総溶出量と許容摂取量（70 年間、毎日 2 リットル飲用した場合、10 万人に 1 人の健康被害が生じる基準値（＝土壌の環境基準）からの算定量）とを比較することなどが考えられる。ただし、想定期間中の総溶出量を求める方法は確立した方法がないので、評価にあたっては学識経験者等の専門家による判断が必要である。

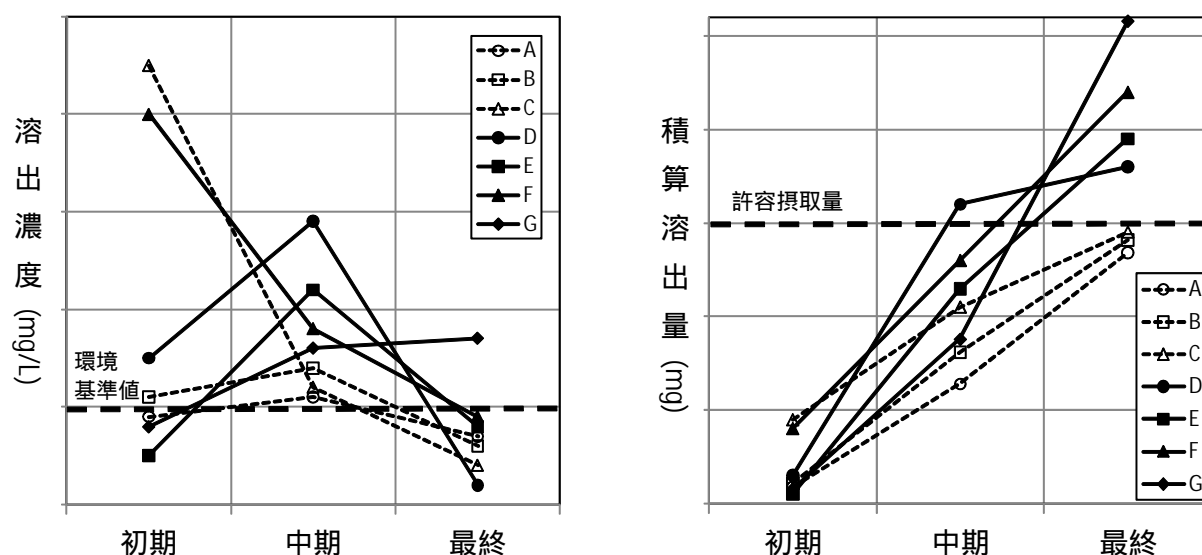


図 4.9.4 溶出濃度の時間変化と積算溶出量の関係
 (A,B,C は積算溶出量が許容摂取量未満のため対策不要)
 (D,E,F,G は積算溶出量が許容摂取量超過のため要対策)

表 4.9.4 溶出試験結果の解釈の例（許容摂取量を超える場合を要対策とした）

初期溶出濃度	中間濃度	最終濃度	想定期間中の総溶出量と許容摂取量の比較	判定	図 4.9.4 の例
基準超過	初期に比べ上昇（基準超過）	中間以上（基準超過）	超える	要対策	-
		初期・中間に比べ低下（基準適合）	超える	要対策	D
			超えない	対策不要	B
	初期に比べ低下	初期・中間に比べ低下（基準適合）	超える	要対策	F
			超えない	対策不要	C
基準適合	初期に比べ上昇（基準超過）	中間以上（基準超過）	超える	要対策	G
		基準適合	超える	要対策	E
			超えない	対策不要	A
	低下	基準適合	超えない	対策不要	-

専門家の総合評価 3 のサイト概念モデルを用いた評価を行うことができるのは、発生する岩石・土壌の利用場所とその後の管理方法が明らかな場合のみであることに留意する。サイト概念モデルを用いた評価に当たっては、サイト概念モデル（第 5 章）を構築し、発生源近傍で地下水飲用による人の健康への影響の可能性があるかどうか、定性的に評価する。「リスクがある」と判断される場合は、例えば、発生源評価において「リスクがある」と判断され、かつ、発生源より地下水の下流方向近傍に飲用井戸が存在する場合などが挙げられる。一方、発生源評価において「リスクがない」と判断される場合や、発生源における重金属等の溶出量が大きくなく、発生源近傍に飲用井戸が存在しない場合などは「リスクがない」と判断される。

リスク評価は、「第 5 章 リスク評価」にしたがって行う。

4.10 直接摂取のリスクを把握するための試験

岩石・土壌の直接摂取のリスクを評価する場合、直接摂取のリスクを把握するための試験を行う。
--

(1) 試験法の位置付け

岩石・土壌の直接摂取によるリスクを評価する場合、以下に示す試験を実施し、土壌含有量基準と比較する。ただし、本試験の結果は、原理的に「4.8.2 全含有量試験」の結果より必ず小さくなると考えられることから、全含有量試験の結果が土壌含有量基準を下回るものは、岩石・土壌の直接摂取リスクがないと見なすことができる。

(2) 試験法の内容

試験方法は、原則として環境省告示第 19 号「土壌含有量調査に係る測定方法を定める件」による。ただし試料は、「4.7 地質試料の調製」に従い、2mm 以下のふるいを全量通過するまで粉碎したものをを用いる。

(3) 評価

土壌含有量基準を用いて評価を行う。

4.11 リスク評価に必要な地盤特性を把握するための試験

4.11.1 発生源評価に必要な試験

自然由来の重金属等の発生源となる岩石・土壌について、リスク評価を行うために必要となる物理特性および化学特性を把握するための試験を実施する。

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌の評価（発生源評価）を目的として、前述の全含有量、溶出量や含有量（「直接摂取のリスクを把握するための試験」の結果による）のほか、土壌乾燥密度、pH 等を把握する必要がある場合、採取試料を用いて物理試験および化学試験を実施する。

(1) 物理試験

土壌乾燥密度、間隙水の体積分率を把握するための試験方法として、岩石試料については地盤工学会基準「岩石の密度試験方法」(JGS 2132) および「岩石の含水比試験方法」(JGS 2134) を参照されたい。一方、土質試料については、「土の含水比試験方法」(JIS A 1203) および「土粒子の湿潤密度試験方法」(JIS A 1225) を参照されたい。

(2) 化学試験

pH、有機物含有率、粘土含有率を把握するための試験方法については、それぞれ「土懸濁液の pH 試験方法」(JGS0211)、「土の有機炭素含有量試験方法」(JGS 0231) および「土の粒度試験方法」(JIS A 1204) を参照されたい。

4.11.2 周辺地盤評価に必要な試験

自然由来の重金属等の発生源周辺に存在する地盤について、リスク評価を行うために必要となる物理特性および化学特性を把握するための試験を実施する。

発生源周辺の地盤中の重金属等の移行特性の評価（周辺地盤評価）を目的として、前述の地下水位、地下水流向、地下水流速のほか、土壌乾燥密度、遅延係数等を把握する必要がある場合、採取試料を用いて試験を実施する。

(1) 物理試験

土粒子の密度、土壌乾燥密度、間隙水の体積分率および帯水層間隙率を把握するための試験方法として、岩石試料については地盤工学会基準「岩石の密度試験方法」(JGS 2132) および「岩石の含水比試験方法」(JGS 2134) を参照されたい。一方、土質試料については、「土粒子の密度試験方法」(JIS A 1202)、「土の含水比試験方法」(JIS A 1203)、「土粒子の湿潤密度試験方法」(JIS A 1225) を参照されたい。

また、間隙内地下水平均流速のほか、地盤の透水係数を把握する必要がある場合には透水試験を実施する。透水試験には現場透水試験と室内透水試験があるが、現場条件等に応じて適切なものを選択する。

1) 現場透水試験

現場透水試験は岩盤、土質地盤の双方に適用される方法である。その多くは地下水面下の飽和帯地盤に適用されるものであるが、不飽和帯に適用できるものもある。詳しくは「単孔を利用した透水試験方法」(JGS 1314)、「揚水試験方法」(JGS 1315)、「締め固めた地盤の透水試験方法」(JGS 1316)、「孔内水位回復法による岩盤の透水試験方法」(JGS 1321)、「ルジオン試験方法」(JGS 1323) および「注水による岩盤の透水試験方法」(JGS 1322) を参照されたい。

2) 室内透水試験

室内透水試験は一般に土に対して適用される。室内透水試験は、定水位透水試験と変水位透水試験に大別され、透水性が比較的大さい試料に対しては前者が、小さい試料に対しては後者が適している。詳しくは「土の透水試験方法」(JGS 0311) を参照されたい。

(2) 化学試験

pH、有機物含有率、粘土含有率を把握するための試験方法については、それぞれ「土懸濁液の pH 試験方法」(JGS 0211)、「土の有機炭素含有量試験方法」(JGS 0231)、「土の粒度試験方法」(JIS A 1204) を参照されたい。また、遅延係数を把握するための試験方法については、カラム試験およびバッチ試験が存在する。カラム試験およびバッチ試験の詳細については「建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル[暫定版]」の資料-7「移行特性試験方法」を参照されたい。

4.12 水質分析

地下水および表流水等の水質の把握のため、適切な水質分析を実施する。

各種水質分析は、下記の公定法のいずれかに準拠して実施することが望ましい。

工場排水試験方法（JIS K 0102）

上水試験方法（厚生省衛生検査指針、日本水道協会）

国土調査法水質調査作業規定準則（昭和 32 年 3 月総理府令第 14 号）

鉱泉分析法指針（改訂）（環境庁自然保護局、温泉工学会誌、Vol.13, No.1(1978)）

河川水質試験方法（案）[1997 年版]（建設省河川局監修）

地下水に含まれる調査対象物質の量の測定方法を定める件（平成 15 年 3 月環境省告示第 17 号）

ただし、水質把握の目的によっては、迅速分析手法を利用することが適切な場合もある。

また地下水水質試料については、0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過を行い、ろ液を分析に供する。

4.13 迅速判定試験

迅速判定試験は、施工中に掘削した岩石・土壌を対策が必要なものと対策が不要なものに迅速に分別するために実施する。迅速判定試験を適用する場合は、事前に現場状況に応じて分別の基準を設定し、現場施工管理で実施可能な試験を構築する。

(1) 本試験の位置付け

迅速判定試験は、スクリーニング試験、バックグラウンド値試験、溶出試験、ないしは直接摂取リスクを把握するための試験（以下、「規定の試験」という）との相関性が認められる迅速な試験であり、試験対象の岩石・土壌について自然由来重金属等への対応が必要かどうかの判定に用いるものである。

施工前段階での迅速判定試験は、重金属等を含有する岩石・土壌の三次元分布を把握するためのデータの取得、および施工中段階で実用可能な対策要否判定方法を検討するものである。施工中段階での迅速判定試験は、先進ボーリングコア、掘削岩石、仮置き岩石を対象に、施工サイクルが滞ることのないように対策の要否を判定することを目的とするものである。

迅速判定において基準に適合する試料が規定の試験で基準に適合しないことがないようにすべきである。そのため迅速判定基準の設定にあたっては、規定の試験と迅速判定試験を同一試料で数多く実施し、分析結果の対比に基づいて安全側に設定する必要がある。また、経済性の観点からは、迅速判定試験において基準に適合しない試料群には、公定法で基準に適合する試料が限りなく少ないことが望ましい。

(2) 試験区分

迅速判定試験は、岩石・土壌の重金属等の存在状況（含有量と溶出特性）を、規定の試験と相関関係が確認された指標項目の試験により判定するもの（間接法）、および規定の試験方法に基づき処理した抽出液および溶出液について基準項目の分析試験を行い判定するもの（直接法）がある。

表 4.13.1 に迅速判定試験の区分と試験方法の例を文献事例などに基づいて示した。また、迅速判定試験の適用事例について、資料集 10 に示した。

表 4.13.1 迅速判定試験の区分と試験方法の例

分類	試料	目的	試験方法（例）	項目
間接法	岩石・土壌	・変質および風化の程度 ・硫化鉱物とアルカリ鉱物の含有量と分布状況	目視	色調・土性
				硫化鉱物
				炭酸塩鉱物
			硬度計	硬さ
			帯磁率計	帯磁率
			蛍光X線分析	全硫黄
				カルシウム
間接法	溶出液・環境水	・硫化鉱物の酸化状況(水溶出)と長期溶出性(過酸化水素水溶出) ・地下水、表流水モニタリング	pH 指示薬、pH 計	pH
			電気伝導率計	EC
			イオンクロマトグラフィー	硫酸イオン
直接法	岩石・土壌	・スクリーニング試験および岩石・土壌バックグラウンド値試験	蛍光X線分析	Pb,As (Cd,Cr,Hg,Se,F)
	溶出液・環境水	・溶出試験 ・直接摂取リスクの有無(直接摂取リスクを把握するための試験) ・地下水、表流水モニタリング	ストリッピングボルタンメトリー	Cd,Pb,As,Hg,Se
			吸光光度法	Cr(),F,B

(3) 試験方法

1) 間接法

間接法は対象元素の存在や溶出特性と関係が深い間接的な指標を用いて判定を行うものであるため、現場ごとに適用可能な試験方法やその基準が異なる。従って、資料等調査、地質調査および試料の試験結果に基づき、対象となる元素の試料中での存在状態や溶出特性を把握し、これらと関係があると推定できる試験を選択することが肝要である。

試験方法を選択した後、規定の試験で用いた同一試料について、迅速判定試験を数多く適用し、両者の結果の相関関係を確認し、安全側の判定基準を決定する（図 4.13.1）。

特にカドミウム全含有量は亜鉛全含有量と強い相関（亜鉛全含有量の 1/200 から 1/300）があることが一般に知られていることから、たとえば JIS K0470 に準じた方法で実施した亜鉛の蛍光 X 線分析法による分析値から、その地域のカドミウム全含有量と亜鉛全含有量との相関性に基づいてカドミウム含有量を推定することができる。同様に、水銀およびセレンの全含有量は、ひ素含有量のそれぞれ 1/100 および 1/200 程度であることが知られている。

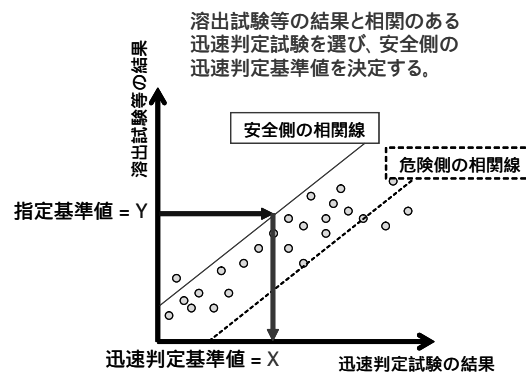


図 4.13.1 間接法による迅速判定基準の決定方法

2) 直接法

直接法は対象元素の固体中の全含有量や、液体中の濃度を直接分析する方法であるため、定量下限値が諸基準値より高い方法は適当ではない。東京都環境局が、土壌中の重金属等の調査費用の低減化、調査期間の短縮化を目的として、簡便・迅速で優良な（精度・感度が規定水準以上）分析方法を公表している（「土壌汚染調査における簡易分析法採用マニュアル（重金属編）」）ので参考になる。

東京都のマニュアルによれば下記の事項を簡易分析法の条件としている。

- a. 一定の精度・感度が確保されること
 - ・実証試験結果が公定法に比べて $\pm 20\%$ 以内に収まること
 - ・基準値の 1/2 以下まで測定可能なこと
- b. 公定法に比べて簡便で短時間で測定できること
- c. 人体および環境に有害な物質を使用しないこと

なお、正確な分析値を得るために、分析対象の岩石・土壌の特性にあった試験方法を用いるよう留意する。

重金属等の基準項目に関する迅速判定試験として、適用事例の多い蛍光 X 線分析法、ストリッピングボルタンメトリー法および吸光光度法等の概要を以下に示す。

蛍光 X 線分析法

乾燥、粒度調整した固体試料に X 線を照射して、発生した蛍光 X 線の強度から濃度を測定する。非破壊で多元素同時分析が出来るという特徴がある。しかし、原理的に試料中の全含有量を測定するため、直接摂取のリスクを把握するための試験の結果（いわゆる土壌含有量）より高い濃度になること、六価クロムなど元素の特定の化学形態を選択的に検出できないことなどに留意が必要である。

ストリッピングボルタンメトリー法

公定法に示された前処理を行い、調整した検液に電極を浸し、電極間の電流量から濃度を測定する。水銀電極を使用する方法では廃液処理に留意が必要である。

吸光光度法など

公定法に示された前処理を行い、調整した検液中の対象物質と呈色試薬との反応により発色した検液の吸光度から濃度を測定する（吸光光度法）。または検液中の対象物質を高温度で原子化させ、吸光度から濃度を測定する（原子吸光法）。

(4) 迅速判定試験の留意点

1) 溶液分析を行う場合の留意点

重金属等を含有する岩石・土壌の対策要否判定の試験方法の手順は、試料の風乾、異物除去、破碎、篩い分け、溶出、固液分離（遠心沈降・ろ過）、分析前処理、分析である。迅速な試験の実施にあたっては試料採取から分析前処理までに多大な労力・時間（費用）を要することも課題であり、省力化と迅速化が必要である。

目的成分を溶出させる方法に関して、公定法と同等の濃度値を得ようとする場合はできる限り公定法と同じ手順を実施する必要がある。一方、目安値や推計値を得る場合は溶出時間や手順を適宜設定することなど目的に適した前処理方法を選択することが望ましい。

2) 蛍光 X 線分析法を用いる場合の留意点

対象元素を固体のまま分析する方法は蛍光 X 線分析法に限られるが、試料表面のごく狭い範囲を測定することとなるため、分析値の代表性が問題となる。改善策として微細化によって試料を均質化するか、測定数を増やして値を平均化する方法が考えられる。いずれの方法が良いかは、必要とする精度とそれにかかる時間・手間の兼ね合いにより判断することが望ましい。

第5章 リスク評価

5.1 対応の方針

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌への対応としては、サイト概念モデルに基づく対応と土壤汚染対策法に準じた対応が存在する。

本マニュアルでは、発生源、周辺状況、周辺地盤といった現場毎の特性を考慮したサイト概念モデルに基づく対応を実施する。なお、土壤汚染対策法や条例等の対象となる場合は、同法や条例等に基づいた対応を図ることとなるが、同法や条例等の対象外であっても都道府県等の環境部局との協議の結果によっては、土壤汚染対策法に準じた対応を実施する場合もある。

(1) 対応の方針

サイト概念モデルとは、自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌（発生源）発生源から敷地境界や保全対象までの距離・曝露経路（周辺状況）周辺地盤の重金属等の吸着特性・地下水の流れ（周辺地盤）などの現場毎の特性を考慮し、環境への影響を評価するためのモデルを指す。サイト概念モデルには、施工前概略調査の結果をもとに構築される「初期サイト概念モデル」と、初期サイト概念モデルより詳細な施工前詳細調査の結果をもとに構築される「サイト概念モデル」の二種類が存在する。

サイト概念モデルに基づく対応と土壤汚染対策法に準じた対応の特徴は以下の通りである。サイト概念モデルに基づき対応することにより現場の状況に応じた過度とならない対策を実施することが可能である。しかし、土壤溶出量試験または土壤含有量試験により、基準値超過が認められた場合には、都道府県等の環境部局との協議を行い、その協議の結果によっては、土壤汚染対策法に準じた対応を実施する場合もある。なお、サイト概念モデルに基づく手法は、高度な解析の知識が求められる場合もあるため、必要に応じて専門家の協力を仰ぐなど、その適用にあたっては留意が必要である。

なお、将来の適切な管理が見込めない場合は、本マニュアルのリスク評価および対策に関する規定を用いることができないことに留意する。

1) サイト概念モデルに基づく対応

地下水等の摂取によるリスクについては、現場毎の特性を考慮したサイト概念モデルを構築してリスク評価を実施し、その結果に基づいて対策を実施する。サイト概念モデルの構築には自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌（発生源）発生源から敷地境界や敷地内に存在する保全対象（飲用井戸など）までの距離・曝露経路（周辺状況）周辺地盤の重金属等の吸着特性・地下水の流れ（周辺地盤）などを適切に考慮する必要がある。リスク評価においては、土壤汚染対策法に示される対策工の考え方に準じたレベル1（標準モデル）を実施し、必要に応じて対策工と効果を考慮したレベル2（詳細モデル）を実施する。リスク評価を実施した場合はモニタリングを必ず実施し、その結果に応じてサイト概念モデルの修正等を行い、リスク評価の不確実性を可能な限り排除する。

直接摂取によるリスクについては、土壤汚染対策法に準じて土壤含有量試験による発生源の評価と周辺状況によりリスク評価を実施し、その結果に基づいて対策を行う。

2) 土壤汚染対策法に準じた対応

土壤溶出量試験と土壤含有量試験による発生源の評価と周辺状況に基づいてリスク評価を実施し、その結果に基づいて対策を行う。（「5.2 [参考] 土壤汚染対策法に準じた対応」参照）

(2) 対応の流れ

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌のリスク評価・対策・モニタリングは、**図 5.1.1** に示すような流れにより実施する。なお、いずれの場合も「汚染土壌の処分方法（平成 15 年 3 月 15 日環境省告示第 20 号）」に準じて自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌が搬出後に処分される場合には本マニュアルは適用の対象外とする。

環境部局との協議

施工前概略調査の結果、自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌を掘削する場合は都道府県等の環境部局と協議する。その結果、本マニュアルに基づく対応を採用する場合は、初期サイト概念モデルの構築以降の

対応を実施する。一方、土壤汚染対策法に準じた対応を採用する場合は、「5.2 [参考] 土壤汚染対策法に準じた対応」を参考に対応を実施する。また、環境部局との協議は対応の初期だけでなく、合意形成を図りながら対応を進めるため、対応の流れに応じて複数回実施することが望ましい。なお、協議の対象となる都道府県等の環境部局の一覧については、環境省のホームページに記載されているため参照されたい。

初期サイト概念モデルの構築

施工前詳細調査の計画立案に活用するため、施工前概略調査の結果をもとに初期サイト概念モデルを構築する。

施工前詳細調査

構築した初期サイト概念モデルを参考に、計画を立案し、施工前詳細調査を実施する。

サイト概念モデルの高精度化

リスク評価や対策の設計、モニタリング計画の立案に活用するため、施工前詳細調査の結果をもとに初期サイト概念モデルを発展させ、より詳細かつ高精度なサイト概念モデルを構築する。

リスク評価

サイト概念モデルをもとにリスク評価を実施し、判定基準と比較する。前述のようにリスク評価にはレベル1（標準モデル）とレベル2（詳細モデル）が存在する。レベル1では、リスク評価の結果をもとに土壤汚染対策法に示される対策工の考え方に準じた設計・施工を実施することを基本とする。一方、レベル2では、対策工法の効果を適切にサイト概念モデルの中で考慮することにより、現場状況に応じた対策の選定・設計・施工が実施可能となる。

対策の選定・設計・施工

リスク評価の結果に基づき、関係機関との合意形成を図りながら、必要に応じて適切な対策を実施する。現地の状況に応じて地下水等の摂取および直接摂取によるリスクを回避ないしは低減する対策を選択し、設計するとともに、モニタリング計画を立案する。

モニタリングの実施

モニタリングの結果に応じてサイト概念モデルの修正等を行い、リスク評価の不確実性を可能な限り排除する。

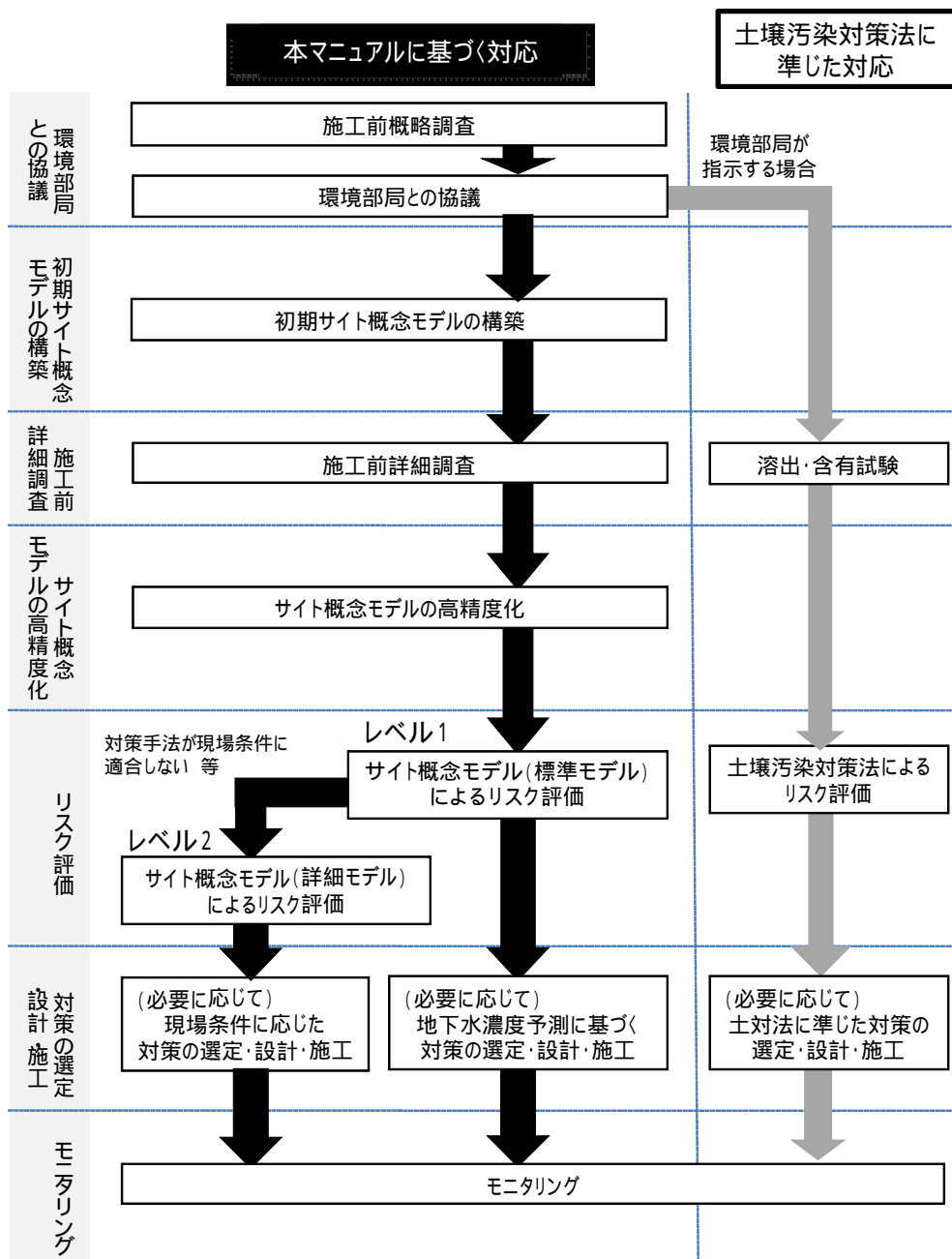


図 5.1.1 リスク評価・対策・モニタリングの流れ

5.2 サイト概念モデルに基づく対応

発生源、周辺状況、周辺地盤といった現場毎の特性を考慮したサイト概念モデルを構築し、リスク評価を行う。

サイト概念モデルに基づく対応では、地下水等の摂取によるリスク評価および直接摂取によるリスク評価を以下の項目について実施する。そのほかに、酸性水の発生の可能性がある場合については、**資料集 1 4** に示す酸性水の発生を防止する対策の実施を検討する。なお、リスク評価に用いる計算式・入力パラメータ等については**資料集 1 1** および **1 2** を参照されたい。

(1) 初期サイト概念モデルの構築

施工前詳細調査の計画立案に活用するため、施工前概略調査の結果をもとに初期サイト概念モデルを構築する。初期サイト概念モデルは具体的に以下の手順で構築する。

発生源評価（概略）

自然由来の重金属等の含有量あるいは溶出量を、「4.8 スクリーニング試験および岩石・土壌の含有量バックグラウンド値試験」、「4.9 溶出試験」、「4.10 直接摂取のリスクを把握するための試験」等の結果をもとに設定する。なお、岩石・土壌に含まれる自然由来の重金属等の全含有量から対象となる岩石・土壌と地下水の理論的な濃度比（分配係数）を算出することも可能である。

周辺状況評価

発生源評価（概略）の結果、**表 3.1.1** に示す土壌溶出量基準・土壌含有量基準を超過する場合のみ周辺状況の評価を実施する。曝露経路を設定するため、周辺状況については敷地境界、飲用井戸など保全対象の位置、地下水までの距離、一般人の立ち入り可能性等を、「4.3 資料等調査」、「4.4 地質調査」、「4.5 水文調査」等の結果をもとに把握する。

初期サイト概念モデルの構築

発生源評価（概略） 周辺状況評価の結果をもとに、**図 5.2.1** に示すように発生源の自然由来の重金属等の含有量・溶出量、曝露経路、保全対象の位置・距離等を明確にした初期サイト概念モデルを構築する。

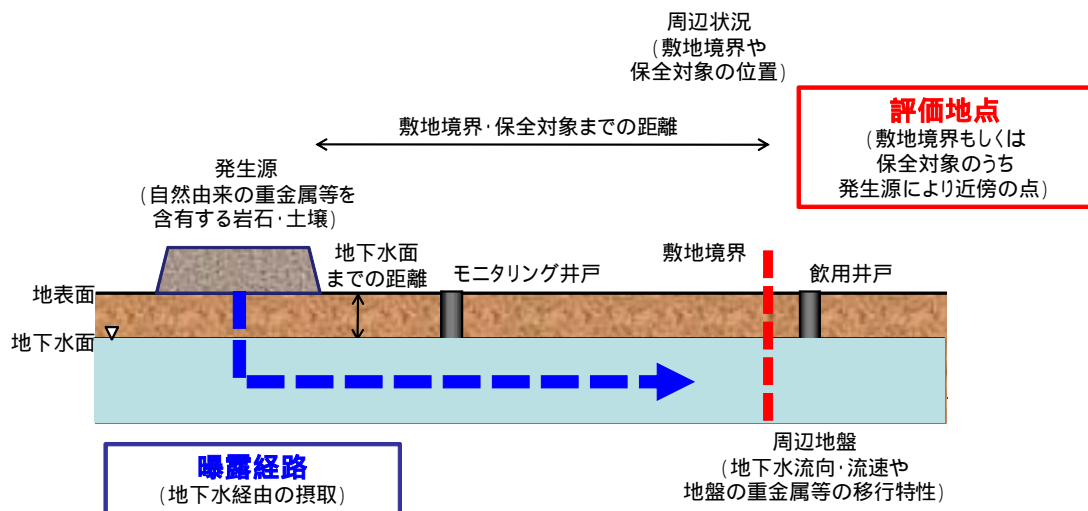


図 5.2.1 初期サイト概念モデルの例

施工前詳細調査

構築した初期サイト概念モデルを参考に、施工前詳細調査の計画を立案し、詳細な調査を実施する。リスク評価には曝露経路近傍、対策の設計には岩石・土壌の保管位置近傍に関する調査結果が特に重要である。

(2) サイト概念モデルの高精度化

リスク評価や対策の設計、モニタリング計画立案に活用するため、施工前詳細調査の結果をもとに初期サイト概念モデルを発展させ、より詳細かつ高精度なサイト概念モデルを構築する。サイト概念モデルは初期サイト概念モデルをもとに具体的に以下の手順で高精度化する。

発生源評価（詳細）

初期サイト概念モデルの構築の段階における発生源評価と同様に、「4.8 スクリーニング試験および岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値試験」、「4.9 溶出試験」、「4.10 直接摂取のリスクを把握するための試験」等の結果を設定する。ただし、「4.9.4 実現象再現溶出試験」やより多くの地点および試料での溶出試験など施工前詳細調査の結果を反映し、より詳細な発生源の特性および空間分布を把握し、リスク評価の入力値として利用することも可能である。また、「4.11 リスク評価に必要な地盤特性を把握する試験」のうち「4.11.1 発生源評価に必要な試験」についても、使用するリスク評価手法に応じて適切な試験を実施する。

周辺地盤評価

発生源評価(詳細)の結果、表 3.1.1 に示す土壌溶出量基準を超過する場合のみ周辺状況の評価を実施する。周辺地盤における地下水流速、流向等の地下水流況、および周辺土壌の物理特性と重金属等の吸着特性等は、自然由来の重金属等の移流・拡散を支配するため、その空間分布を含めて適切に「4.4 地質調査」、「4.5 水文調査」、「4.11 リスク評価に必要な地盤特性を把握する試験」のうち「4.11.2 周辺地盤評価に必要な試験」等の結果をもとに把握する。

判定基準設定

地下水等の摂取によるリスクについては、敷地境界や保全対象近傍のうち発生源に近い方での地下水濃度を環境基準値もしくは地下水バックグラウンド値と比較して評価する。対策を実施した場合において、対策箇所が敷地境界や保全対象から距離が離れている場合は、敷地境界や保全対象と対策箇所との間の適切な位置に評価地点を追加し、施工結果の評価を行う。直接摂取によるリスクについては、土壌含有量基準と比較して評価する。判定の基準となる地下水環境基準、土壌含有量基準については表 3.1.1、地下水バックグラウンド値の定義については「3.2 バックグラウンド値」に示す通りである。

サイト概念モデルの高精度化

初期サイト概念モデルをもとに、発生源評価、周辺地盤評価の結果を加え、図 5.2.2 に示すように発生源の自然由来の重金属等の含有量・溶出量、周辺土壌の物理特性と自然由来の重金属等の吸着特性、および地下水の流況とそれらの空間分布、実施する対策(レベル 2(詳細モデル)のリスク評価を実施する場合)を考慮し、高精度なサイト概念モデルを構築する。

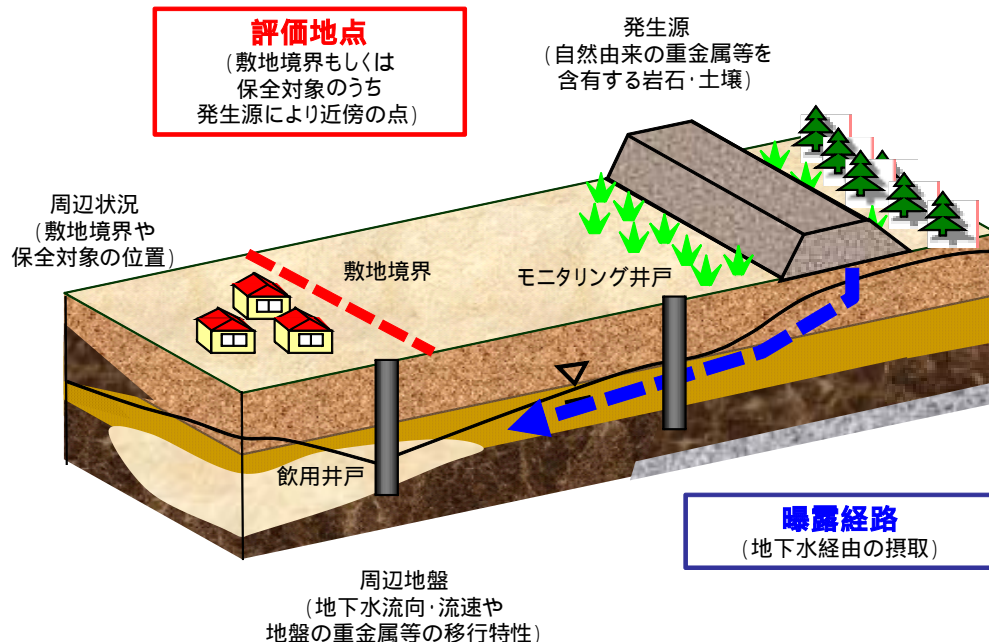


図 5.2.2 サイト概念モデルの例

(3) リスク評価

地下水等の摂取によるリスク評価

サイト概念モデルを用いて、自然由来の重金属等が敷地境界や保全対象近傍に達する場合の時間、地下水濃度を移流分散解析等により求め、判定基準と比較し、評価期間を 100 年間としたリスク評価を実施する。その結果、敷地境界や保全対象近傍の地下水濃度が判定基準を超過する場合については、適切な対策を実施する。

リスク評価にはレベル 1(標準モデル)とレベル 2(詳細モデル)が存在する。レベル 1 は 1 次元解析が基本であり、初期サイト概念モデルに基づいて解析を実施するものである。追加調査によって取得した現地のパ

ラメータを利用することもできる。なお、対策工の効果については考慮しない。レベル2は多次元解析が基本（1次元も可能）となる。現地の詳細な調査に基づき、精度を向上させたサイト概念モデルおよび調査や試験に基づき取得したパラメータを用い、対策工の効果も考慮可能としたものである。

レベル1では、リスク評価の結果をもとに土壤汚染対策法に示される対策工の考え方に準じた対策の設計・施工を実施することを基本とする。一方、レベル2では、対策工法の効果を適切にサイト概念モデルの中に考慮することにより、現場状況に応じて対策の設計・施工が実施可能となる。レベル1とレベル2の違いと対策については表5.2.1に示すとおりである。一般的にレベル1と比較してレベル2は対策費用の縮減が可能となる一方で、サイト概念モデルの精度を確保するために調査コストが増大する。検討の流れとしては、まずレベル1のリスク評価を実施した結果、土壤汚染対策法に示される対策工の実施が困難な場合や構造物の安定に影響を及ぼすなど現場条件に適さないことが明らかになった場合はレベル2のリスク評価を実施する。

なお、リスク評価に用いられる解析手法は現場条件によりその適用に限界がある。例えば、移流分散解析に基づいている手法（GERAS2やDTRANSUなど、詳細はAppendix35ページ参照）については、その適用範囲は土壌中の移流分散現象に限られる。そのため、ダルシー則に従った地下水流動が期待できない岩盤上に保管された自然由来の重金属等を含む岩石・土壌のリスク評価には使えない。また、ほう素については岩石・土壌への吸着が極めて小さいため、地下水流とほぼ同じ移流特性を持っている、これらの場合は発生源評価のみの結果をもとに対策の設計・施工を実施することも検討する。これらのことから、現場条件と利用する予定の解析手法の適用範囲を考慮して、リスク評価を実施する必要がある。

表 5.2.1 リスク評価の結果に応じた対策（地下水等の摂取）

		サイト概念モデル		[参考] 土壌汚染対策法
		レベル1(標準モデル)	レベル2(詳細モデル)	
評価地点		敷地境界や保全対象近傍		発生源
評価地点における 地下水濃度	環境基準値/地下水バックグラウンド値以下 ^{*1}	モニタリングのみ ^{*2}		
	環境基準値/地下水バックグラウンド値超過 ^{*1}	土壌汚染対策法に示される 対策工の考え方に準じた 対策	評価地点における地下水 濃度が環境基準値、地下 水バックグラウンド値以下と なる適切な対策	(必要に応じて) 土壌汚染対策法に 基づく対策
	第二溶出量超過			

^{*1} 環境基準値と地下水バックグラウンド値のいずれかのうち高い方

^{*2} 覆土などの表面被覆が必要

直接摂取によるリスク評価

自然由来の重金属等を含む岩石・土壌の存在する場所への、一般人の立ち入り可能性を検討する。その結果、一般人の立ち入り可能性がある場合については、汚染の除去等の措置（覆土など）を実施する。

(4) モニタリング

モニタリング結果をリスク評価の結果と比較・検証し、必要に応じてサイト概念モデルの修正を実施する。地下水の流れは複雑な現象であり、モニタリングによってサイト概念モデルの精度を向上することは、リスク評価の信頼性を高めるために重要である。なお、修正したサイト概念モデルによりリスク評価を実施した結果、新たな対策の必要性が生じた場合は適切な対応を検討しなければならない。

【参考：土壤汚染対策法に準じた対応】

土壤汚染対策法に準じた対応を実施する場合は、以下の手順により、曝露経路ごとのリスク評価を実施することが可能である。

1) 地下水等経由のリスク

発生源評価

土壤溶出量試験（平成 15 年 3 月環境省告示第 18 号）を実施し、土壤溶出量基準（平成 14 年 12 月環境省令第 29 号）と比較する。

リスク評価

発生源評価の結果、土壤溶出量基準を超過する場合のみ周辺状況の評価を実施する。なお、判定の基準となる土壤溶出量基準については表 3.1.1 に示す通りである。

リスク評価は、自然由来の重金属等を含有する地下水が、直近の飲用井戸に到達する可能性を検討することにより実施する。到達する可能性については表 5.2.2 に示す各物質に定められた地下水中の移動距離と飲用井戸までの距離を比較することにより実施する。なお、到達する可能性が高い範囲は、原則として不圧地下水の主流動方向の左右それぞれ 90 度の全体で 180 度（当該地域が一定の勾配を持つこと等から地下水の主流動方向が大きく変化することがないと認められる場合には、左右それぞれ 60 度の全体で 120 度）の範囲とする。その結果、敷地境界もしくは保全対象近傍に自然由来の重金属等が到達する可能性がある場合については、発生源評価の結果に応じた汚染の除去等の措置（封じ込めなど）を実施する。

表 5.2.2 各物質の地下水中の移動距離

（出典：土壤汚染対策法の施行について、環水土第 20 号、平成 15 年 2 月 4 日）

物 質	一般値 (m)
六価クロム	概ね 500
ひ素、ふっ素、ほう素	概ね 250
カドミウム、鉛、水銀、セレン	概ね 80

2) 直接摂取のリスク

発生源評価

土壤含有量試験（平成 15 年 3 月環境省告示第 19 号）を実施し、発生源評価として土壤含有量基準（平成 14 年 12 月環境省令第 29 号）と比較する。なお、判定の基準となる土壤含有量基準については表 3.1.1 に示す通りである。

リスク評価

発生源評価の結果、土壤含有量基準を超過する場合のみ周辺状況評価を実施する。自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌の存在する場所への、一般人の立ち入り可能性を検討する。その結果、一般人の立ち入り可能性がある場合については、汚染の除去等の措置（覆土など）を実施する。

第6章 対策

6.1 対策の選定・設計

リスク評価もしくは専門家の総合評価の結果に基づき、以下に示す対策を適切に選定、設計する。

- ・「地下水等の摂取によるリスク」を防止するための対策
- ・「直接摂取によるリスク」を防止するための対策

(1) 対策の考え方

第5章に示したリスク評価の結果、もしくは第4章の専門家の総合評価の結果に基づいて、関係機関等との合意形成を図りながら対策を選定する。

自然由来の重金属等を含有する岩石・土壌を対象とした対策とは、地下水等の摂取と直接摂取による影響の発生源・経路を遮断、もしくは曝露量を低減することである。

地下水等の摂取による影響を防止するための対策選定の考え方を表6.1.1に示す。サイト概念モデルに基づく対応を行った場合、対象サイトの評価地点は敷地境界、もしくは保全対象近傍になる。その地点における地下水濃度が地下水環境基準もしくは地下水バックグラウンド値以下の場合は、モニタリングのみを実施することを基本とする。ただし、拡散防止などの観点から覆土などの表面被覆を実施する必要がある。一方、それらを超過する場合は、リスク評価の結果に基づき、必要な対策を実施する。レベル1(標準モデル)によるリスク評価のみを行った場合は、土壌汚染対策法に示される対策工の考え方に準じた対策の選定、設計を実施する。レベル2(詳細モデル)によるリスク評価も行った場合は、現場状況に応じて、移流分散解析の結果に基づく対策の選定、設計が実施可能である。

対策の選定に当たっては、リスク評価や施工性など総合的に判断し、現場条件に応じて複数の対策手法を併用することも可能である。

専門家の総合評価で「リスクあり」と判定され、リスク評価を実施しない場合は、専門家の総合評価の結果に基づき、覆土もしくは土壌汚染対策法に示される対策工の考え方に準じた対策を実施するとともに、モニタリングを実施する。

なお、土壌汚染対策法や条例等の対象となる場合は、同法や条例等に基づいた対応を図ることとなるが、同法や条例等の対象外であっても都道府県等の環境部局との協議の結果によっては、同法に準じた対応を実施する場合もある。

表 6.1.1 地下水等の摂取による影響を防止するための対策の選定(表 5.2.1 の再掲)

		サイト概念モデル		[参考] 土壌汚染対策法
		レベル1(標準モデル)	レベル2(詳細モデル)	
評価地点		敷地境界や保全対象近傍		発生源
評価地点における 地下水濃度	環境基準値/地下水バックグラウンド値以下 ^{*1}	モニタリングのみ ^{*2}		
	環境基準値/地下水バックグラウンド値超過 ^{*1}	土壌汚染対策法に示される 対策工の考え方に 準じた対策	評価地点における地下水濃度が環境基準値、地下水バックグラウンド値以下となる適切な対策	(必要に応じて) 土壌汚染対策法に基づく対策
	第二溶出量超過			

^{*1} 環境基準値と地下水バックグラウンド値のいずれかのうち高い方

^{*2} 覆土などの表面被覆が必要

直接摂取による影響を防止するための対策選定の考え方は、「4.10 直接摂取のリスクを把握するための試験」の結果に基づき、土壌汚染対策法に示される対策工の考え方に準じた対策を実施する。

表 6.1.2、表 6.1.3 に対策の具体的な内容を曝露経路ごとに整理したものを示す。なお、不溶化等および吸着層による対策については、試験方法、評価方法が標準化されていないため、現場ごとに技術的検討を実施する必要がある。

建設工事の実施によって酸性水が発生する可能性がある場合については、資料集 1 4 に示す酸性水の発生を防止する対策の実施を検討する。

なお、工事実施区域外に対策が必要な岩石・土壌を搬出する場合は、本マニュアルの技術的事項を参考に、より

適切な対策を選定、設計することが可能である。ただし、事業者以外が所有する土地に処分を行う場合においては、地権者の同意を得ると共に将来の適切な管理に関する取り決めを行う必要がある。

表 6.1.2 地下水等の摂取による影響を防止する対策の内容

対 応	目 標	具体的な内容 (下記対策を複数併用することも可能)	備 考
レベル1のリスク評価による選定可能な対策		遮水工封じ込め(不溶化後の封じ込めを含む) 遮断工封じ込め	土壌汚染対策法に示される対策工の考え方に準じた対策
レベル2(詳細モデル)のリスク評価による選定・設計可能な対策	(1) 雨水・地下水の浸透、および浸出水の発生防止	粘性土等による被覆・浸透防止 転圧による透水性の低下	リスク評価に基づく対策
	(2) 重金属等の溶出低減	不溶化等の処理	
	(3) 重金属等の捕捉	吸着層 浸出水処理	
	(4) その他	一体区域*への搬出	-

*ここで一体区域とは、同一の自然的原因により重金属等が存在し、かつ岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値が同程度以上の区域を指す。

表 6.1.3 直接摂取による影響を防止する対策の内容

対 応	目 標	具体的な内容 (下記対策を複数併用することも可能)	備 考
レベル1、レベル2のリスク評価で選定する対策	曝露の遮断	立入り禁止 舗装 盛土	土壌汚染対策法に示される対策工の考え方に準じた対策

(2) 地下水等の摂取による影響を防止する対策

1) レベル1のリスク評価によって選定可能な対策

ここでは、土壌汚染対策法に示される対策工の考え方に準じた地下水等の摂取による影響を防止する対策を示す。

1)-1 遮水工封じ込め

遮水工封じ込めは、雨水・地下水の浸透、および浸出水の発生を防止するため、遮水工で封じ込めを行う対策である。遮水工封じ込めの概念図を図 6.1.1 に、遮水工の構造を図 6.1.2 にそれぞれ示す。

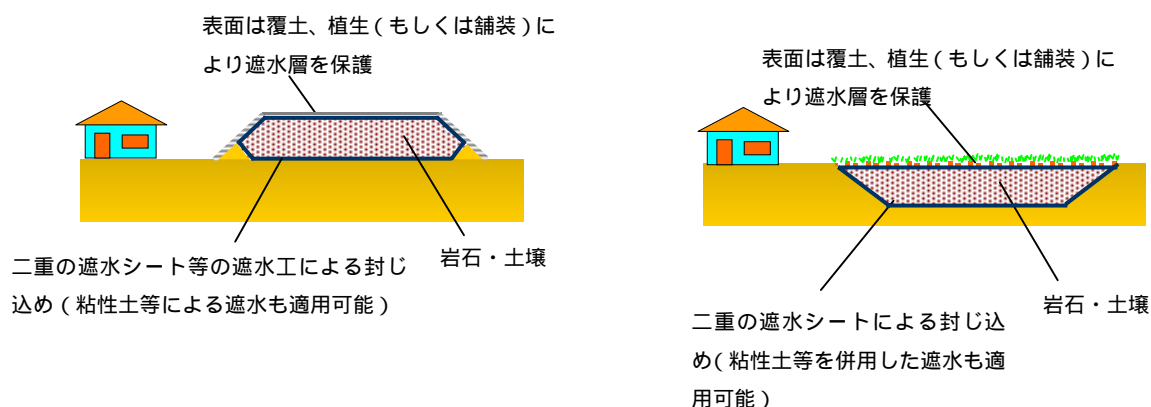
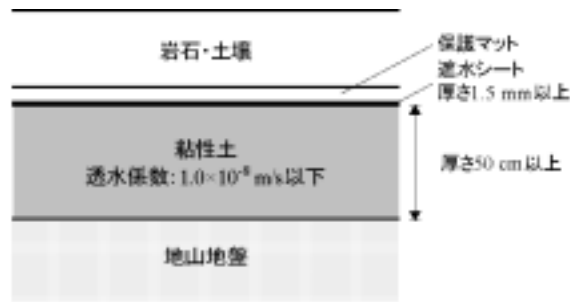
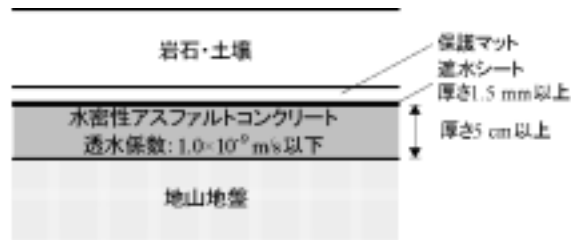


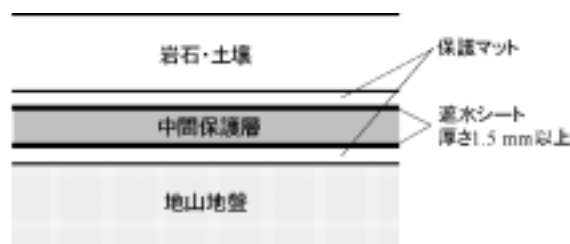
図 6.1.1 遮水工封じ込めの概念図



）粘性土（土質系遮水材料）



ii) 水密性アスファルトコンクリート



iii) 保護層

注）代表的な遮水シート材には、合成ゴム系、合成樹脂系、アスファルト系、ベントナイト系、積層タイプ複合系があり、それぞれに強度、耐薬品性、施工性に特徴があるので、目的に合った遮水シートを選択する。

図 6.1.2 土壌汚染対策法に基づく遮水工の構造

遮水工封じ込めの適用にあたっては以下の点に留意する必要がある。詳細は参考文献（土壌汚染対策法に基づく調査および措置の技術的手法の解説）を参照されたい。

- ・ 封じ込め内部に水が侵入すると周辺に重金属等が拡散するリスクがあるため、封じ込めを行った場所の上面、周辺は降雨・表流水の浸透を防止する構造をもつ覆いを施工する。
- ・ 重金属等の溶出量が第二溶出量基準を超過する場合には、不溶化等の処理を行い第二溶出量基準に適合させる必要がある。
- ・ 第7章で示すモニタリングに加え、封じ込め内部の水位を観測する。
- ・ 遮水材料に影響を与える物質が存在する場合、例えば酸性水の発生を伴う場合などは遮水材料に影響がないことを確認する。
- ・ 遮水シート等を敷設する際にあらかじめ基礎地盤の整地等を行い、その施工にあたっては、一般的には専門の施工業者が対応する必要がある。例えば、積雪寒冷地における冬期間の施工では、シート同士が溶着しないといった問題が生じるため、留意する必要がある。また施工中で上面に遮水シートがない期間は、岩石・土壌に雨水が浸入し排水されるため適切に水処理をする必要がある。さらにシートが紫外線等で劣化することを防ぐため、シート上面は覆土等で保護する必要があるほか、盛土の安定にも十分に留意する必要がある。

1)-2 遮断工封じ込め

遮断工封じ込めは、雨水・地下水の浸透、および浸出水の発生を防止するため、遮断層で封じ込めを行う対策で

ある。遮断層には一軸圧縮強さが 25 N/mm^2 以上、厚さが 35cm 以上の水密性を有する鉄筋コンクリート、もしくはこれと同等以上の遮断性能を有するものを適用する必要があり、上面も雨水浸透を防止するためコンクリート蓋で被覆する必要がある。遮断工封じ込めの概念図を図 6.1.3 に示す。

遮断工封じ込めは土壌溶出量基準を超過する岩石・土壌に適用可能であるが、その詳細、適用にあたっての留意点は参考文献¹⁾を参照されたい。

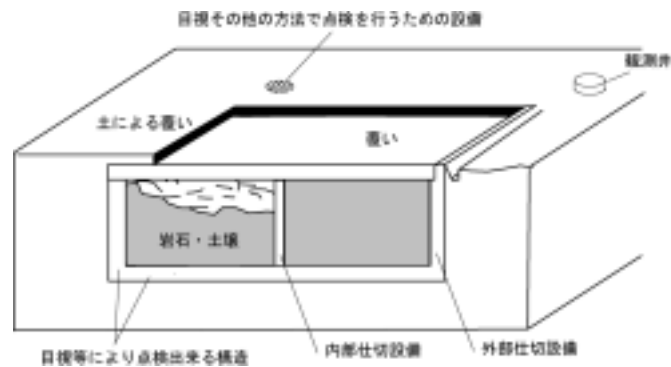


図 6.1.3 遮断工封じ込めの概念図

2) レベル 2 のリスク評価によって選定・設計可能な対策

ここでは、レベル 2 のリスク評価の結果に基づいた地下水等の摂取による影響を防止する対策を示す。ここで示す対策は性能基準が明確に規定されていない対策であることから、適用にあたっては対策効果を見込んだレベル 2 のリスク評価を必ず実施し、敷地境界や保全対象区域近傍における地下水中の重金属等の濃度が環境基準値、もしくは地下水バックグラウンド値以下となるよう対策を選定・設計する。

2)-1 雨水・地下水の浸透、および浸出水の発生防止

粘性土等による被覆・浸透防止

粘性土等による被覆・浸透防止は、雨水・地下水の浸透、および浸出水の発生の防止、および溶出した重金属等の拡散を防止することを目的とした対策である。覆土、敷土に使用できる代表的な材料としては粘性土、改良土およびベントナイト系混合土といった低透水性の土質材料、遮水シートが挙げられる。

粘性土による被覆は、重金属等を含む岩石・土壌の盛土の表面に粘性土（もしくは難透水性舗装）を敷設する対策である（図 6.1.4）。サイト概念モデルにおいて、盛土上部からの水の浸透がないため周辺への重金属等の流出も無いと評価できる。また、盛土内部への空気への侵入もできるだけ防止し、岩石・土壌の酸化を防止する効果も付随的に期待できることから、酸性水対策としても活用できる。厚さ 50cm 以上の覆土は直接摂取によるリスクを防止する対策となり、また透水係数が $1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 以下で厚さ 50cm 以上の粘土層は、遮水シートと同等の性能となる。

設計・施工にあたっては、盛土上面からの水の浸入防止の確実性（上面）や底面からの水の浸入防止の確実性（高水時の留意等）を検討する必要がある。また、地下水位が高い場所や高水時に水没するような場所では適用できないことに留意する必要がある。

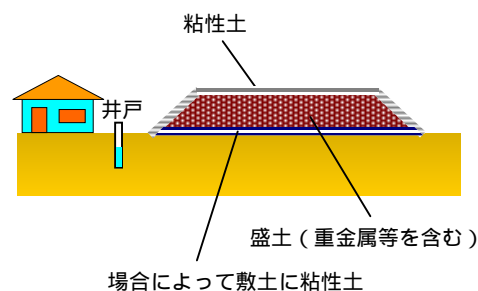


図 6.1.4 粘性土による被覆の概念図

遮水シート等を用いた被覆・浸透防止は、岩石・土壌からの重金属等の溶出を防止するため、遮水シート等で封じ込めを行う対策である（図 6.1.5）。ここでは、一重遮水、粘性土シートなどの土壌汚染対策法上は遮水工とみな

さない構造が該当する。周辺への重金属等の漏出が適切に防止できる構造であればいずれの方法も適用可能である。

設計・施工にあたっては、盛土内部への水の浸入防止の確実性や盛土内部の水の浸出防止の確実性を検討する必要がある。遮水シート等を敷設する際には、あらかじめ地盤の整地等を行い、その施工にあたっては、一般的には専門の施工業者が対応する必要がある。例えば、積雪寒冷地における冬期間の施工では、シート同士が溶着しないといった問題が生じるため、留意する必要がある。また施工中で上面に遮水シートがない期間は、岩石・土壌に雨水が浸入し排水されるため適切に水処理をする必要がある。さらにシートが紫外線等で劣化することを防ぐため、シート上面は覆土等で保護する必要があるほか、盛土の安定にも十分に留意する必要がある。

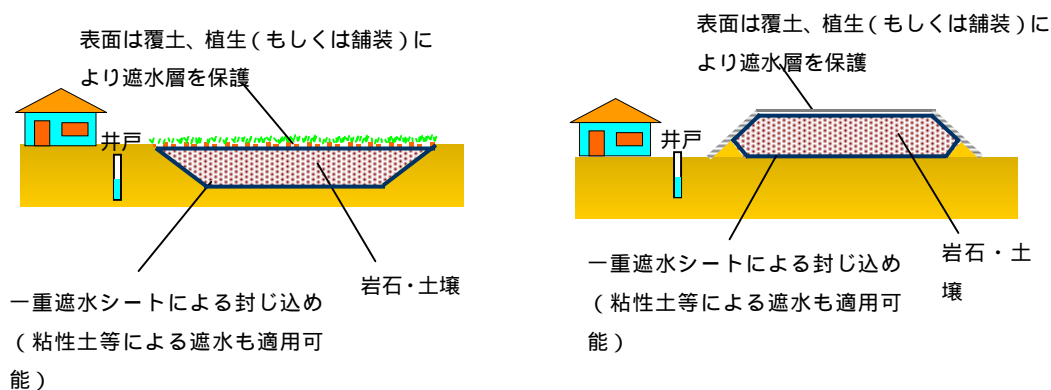
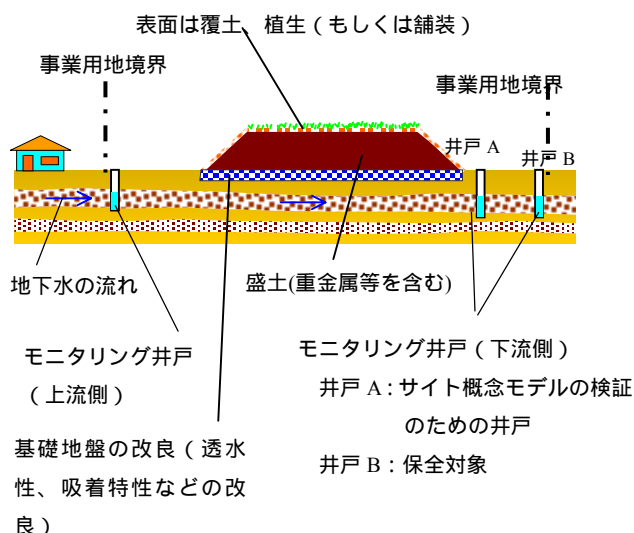


図 6.1.5 遮水シート等を用いた被覆・浸透防止の概念図

基礎地盤の一部改良による対策はサイト概念モデルにおいて周辺地盤評価を行い、敷地境界や保全対象近傍に影響を及ぼす（土壌溶出量基準や地下水バックグラウンド値を超過する）と判断された場合に、基礎地盤の一部を改良（透水性、吸着特性などの改良）することで重金属等の浸透を防止する対策である（図 6.1.6）。

設計・施工にあたっては、重金属等の拡散程度（当該地における許容値を満足するか）を試験等により検討する必要がある。基礎地盤の改良仕様については、事前の性能試験等で性能を設定し、サイト概念モデルにより検証する必要がある。



現状の地盤だけでは重金属等の拡散を防止できないと判断した場合に、基礎地盤の一部を改良することで重金属等の拡散を防止する。

図 6.1.6 基礎地盤の一部改良による対策の概念図

地盤の難透水性を利用した対策は、上面に雨水浸透防止の遮水シート等を施工する必要がある（図 6.1.7）。設計にあたっては、自然由来の重金属等は広域に分布している場合が多いため、原地盤にも重金属等が含まれる

場合にはある範囲だけを遮水壁等で封じ込めても効果が発揮できない可能性がある。

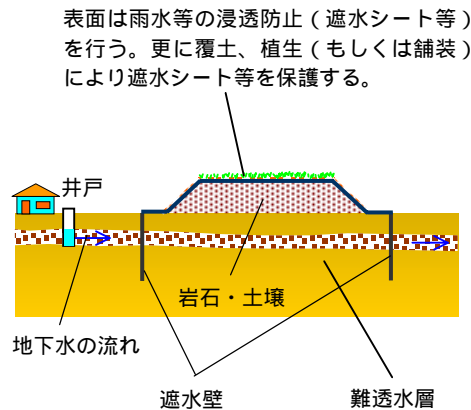


図 6.1.7 地盤の難透水性を利用した対策の概念図

転圧による透水性の低下

転圧による雨水浸透の低減対策は、重金属等を含む岩石・土壌を盛り立てる場合に十分に転圧し、盛土の透水係数を所定の値以下に低下、または粘性土等を混合させることで透水係数を低下させることによる対策である（図 6.1.8）。サイト概念モデルにおいて、盛土の透水性を低下させることで、岩石・土壌が水と接触する機会が減り、周辺への重金属等の流出も抑制できると評価できる。また、盛土内部への空気の侵入もできるだけ防止し、岩石・土壌の酸化を防止する効果も付随的に期待できる。

設計・施工にあたっては、盛土上面からの水の浸入防止の確実性（上面）や底面からの水の浸入防止の確実性（高水時の留意等）を検討する必要がある。また、透水性を低下させるために粘性土等を加える場合は、盛土の安定にも十分に留意する必要がある。

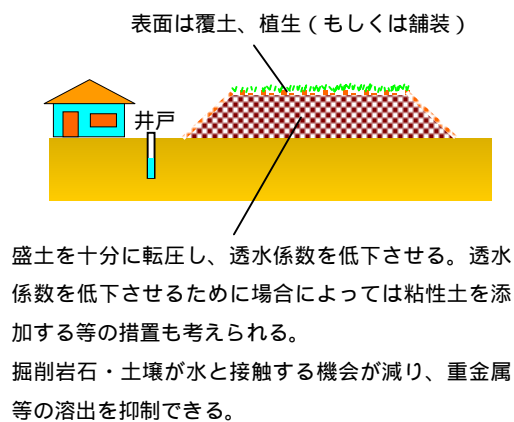


図 6.1.8 転圧による雨水浸透の低減対策の概念図

2)-2 重金属等の溶出低減対策

重金属等の溶出低減を図る対策として不溶化等の処理が挙げられる。不溶化等の処理は岩石・土壌からの重金属等の溶出を低減させるための材料を添加する対策である（図 6.1.9）。不溶化等の処理は化学的不溶化と、物理的不溶化に分けられる。前者は化合形態を溶出しにくいものに変化させる方法や吸着効果を利用して重金属等の溶出を防止する。後者は固化化により水に接触しにくくする方法などがある。不溶化等の処理に用いる代表的な材料としては、各種不溶化材、天然資材、セメントなどが挙げられる。

設計・施工にあたっては、重金属等の種類、化合形態等を考慮する必要がある。岩石・土壌は大きな粒径のものも含むので、不溶化処理土と別途混合する、ないしは不溶化処理土とサンドイッチで盛り立てる必要がある。また、必要に応じて破砕作業を行う場合もある。不溶化効果の継続性（再溶出のおそれがないか）に留意が必要である。また、不溶化材自身による周辺への影響（pH の変化など）にも留意する必要がある。また、重金属等の溶出量が小さい材料を混合して単位質量当りの溶出値が低下するというのではなく、対象となる岩石・土壌自体からの溶出量を効果的に低減できることを事前の試験で確認する必要がある。

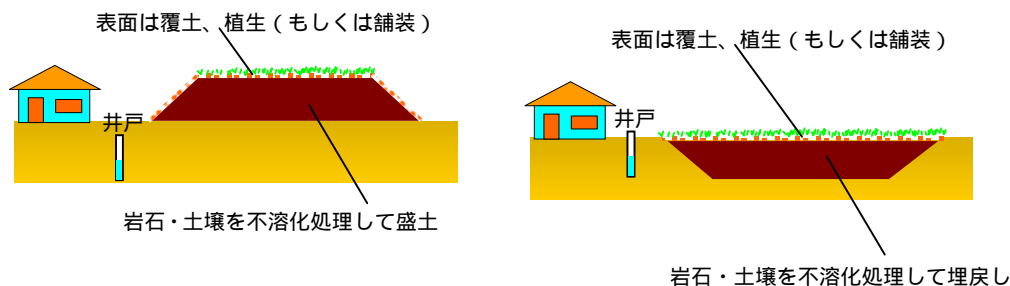


図 6.1.9 不溶化等の処理による対策の概念図

2)-3 重金属等の捕捉

吸着層

重金属等を含む岩石・土壌の盛土基礎に吸着層を敷設することにより、重金属等が地下に浸透することを防止する対策である（図 6.1.10）。吸着層を含んだサイト概念モデルにおいては、盛土から漏出した重金属等が周辺地盤に影響を及ぼさない（土壤溶出量基準や地下水バックグラウンド値を超過しない）ことを検証する必要がある。

設計・施工にあたっては、重金属等の拡散程度（当該地における許容値を満足するか）を試験等により検討する必要がある。吸着材料としては、市場で流通している資材が考えられるが、一般の岩石・土壌でも比較的吸着性能が高いものがあるため、試験等により性能を確認した上で用いることも可能である。吸着現象は永久的な不可逆現象ではなく、環境条件の変化による重金属等の放出も生じる可逆的な現象であることに留意する必要がある。また、吸着層は、用いる資材によって対応できる物質が決まっているので、短期溶出試験（4.9.2）および実現象再現溶出試験（4.9.4）によって対象物質を把握した上で、環境条件（pH や酸化還元状態など）の変化を考慮して、適切な吸着材を選定する必要がある。

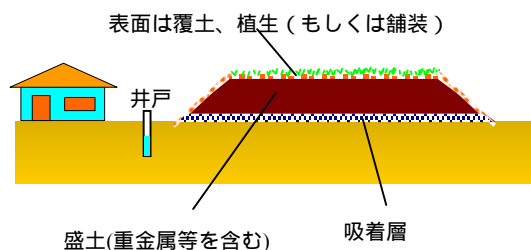


図 6.1.10 吸着層による対策の概念図

浸出水処理

浸出水処理は、掘削した岩石・土壌を風雨にさらした状態で仮置きして、浸出水中に溶出した重金属等を適切に水処理することにより回収する対策である（図 6.1.11）。十分に時間が経過し、岩石・土壌の重金属等溶出量を確認し、溶出の可能性が無いと判断された場合、建設発生土として取り扱うことができる。またサイト概念モデルにより、岩石・土壌からの溶出濃度の低減が評価できるため、周辺への重金属等の流出も抑制できると評価できる。

設計・施工にあたっては、仮置き時の水処理や岩石・土壌の飛散防止措置を適切に行う必要がある。さらに溶出低減の効果（短期的効果、長期的効果）を検討するため、全体の溶出量を低減できることを事前の試験等で確認する必要がある。

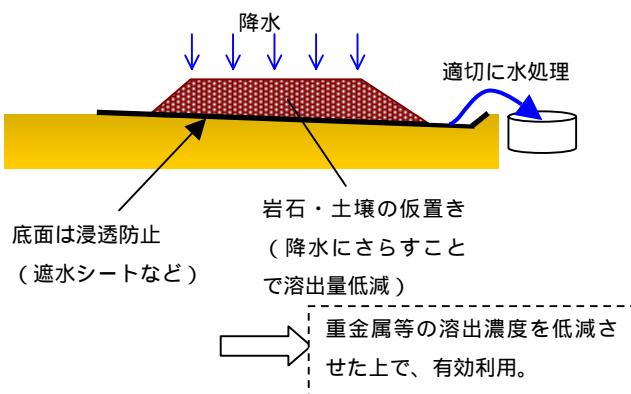


図 6.1.11 浸出水処理による対策の概念図

2)-4 その他

その他の対策として一体区域への搬出による対策が挙げられる。具体的には、同一の自然的原因により重金属等が存在し、かつ岩石・土壌の全含有量バックグラウンド値が同程度以上の区域（一体区域）に盛土もしくは埋戻しを行う対策である（図 6.1.12）。サイト概念モデルにおいて、評価地点における判定基準を地下水バックグラウンド値とした場合、許容値を超過するおそれがないという評価ができる。例えば、鉱山近傍等でバックグラウンド値が高い土地における対策として考えられる。ただし、盛立・埋戻しする場合、拡散防止の観点から表面の覆土、植生もしくは舗装を実施する必要がある。

設計・施工にあたっては、盛土からの溶出の程度（短期的にも長期的にも当該地における許容値を満足するか）の検討が必要である。事前にバックグラウンド値を十分に確認し、評価地点において新たな影響が生じないことを検証しておく必要がある。

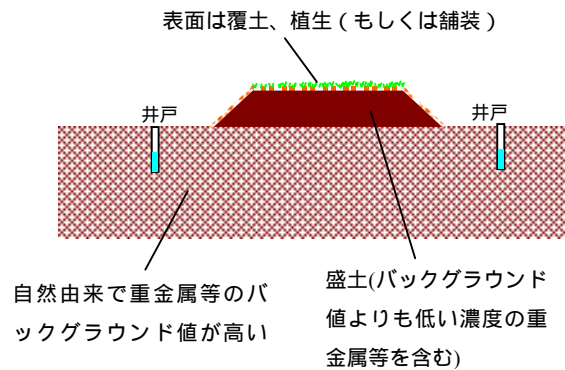


図 6.1.12 一体区域への埋戻し対策の概念図

(3) 直接摂取による影響を防止する対策

ここでは、土壤汚染対策法の考え方に基づいて直接摂取による影響を防止する対策を示す。詳細は参考文献を参照されたい。

立入り禁止

この措置は、重金属等を含む岩石・土壌の範囲に人が立ち入ることを防止するために周囲に囲いを設ける対策である（図 6.1.13）。岩石・土壌の飛散を防止するためにシート等により覆う必要がある。また、入口の見やすい箇所に関係者以外の立ち入りを禁止することを表示する立て札等を設置することが必要である。



図 6.1.13 立入り禁止措置の概念図

舗装

この措置は、重金属等を含む岩石・土壌を厚さが 10cm 以上のコンクリート、厚さが 3cm 以上のアスファルト、もしくは同等の効力を有するものにより覆う対策である（図 6.1.14）。覆いの損壊を防止するために、岩石・土壌を流出、陥没が生じない程度に転圧する必要がある。



図 6.1.14 舗装措置の概念図

盛土

この措置は、重金属等を含む岩石・土壌を土壤汚染対策法の指定基準を満足する盛土により覆う対策である（図 6.1.15）。具体的には、盛土は厚さ 50cm 以上、重金属等の含有・溶出のおそれのない土であること等が定められているが詳細は参考文献¹⁾を参照されたい。盛土と岩石・土壌の間に仕切りを設けること、盛土が流出・陥没しない品質であることが求められる。

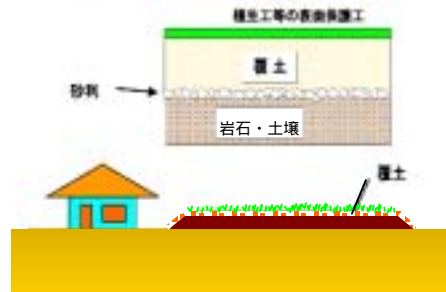


図 6.1.15 盛土（覆土）措置の概念図

【引用文献】

1) (社)土壤環境センター(2003): 土壤汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説, (社)土壤環境センター.

6.2 対策の施工

現場内および周辺への重金属等の拡散を防止するために、大気汚染防止法や水質汚濁防止法、労働安全衛生法などに留意した上で、適切かつ合理的な施工計画を立案し、実施する。

(2) 現場内および周辺への重金属等の拡散防止

対策の実施にあたっては、現場内および周辺への重金属等の拡散を防止するために、以下の事項に留意する必要がある。なお、現場の状況や対象とする重金属等の種類・濃度によっては、これらが当てはまらない場合もある。従って、それぞれの現場に適した方法を選択し、下記以外にも適切な管理方法などを検討し、実施することが望ましい。

工事車両や作業員による拡散の防止

対策が必要な岩石・土壌を取り扱う工事実施区域、対策実施区域とそれ以外の区域を区分する。必要に応じて、立ち入り禁止柵を設置する。また、重金属等を含む岩石・土壌を付着したままで工事車両や作業員等が工事実施区域、対策実施区域の外へ出場することを制限する。例えば、出場時はタイヤ洗浄や靴洗浄などを励行する。

掘削した岩石・土壌の飛散・流出防止、および雨水等の浸透防止

掘削面および仮置き場において、岩石・土壌に不透水シート等による覆いを施し、雨水の浸透や風雨による流出・飛散を防止する。岩石・土壌の仮置き場直下の地表面にも必要に応じて不透水シート等を敷設し、浸出水の発生を防止する。また、防風ネット等の飛散防止設備とともに、工事実施区域、対策実施区域周辺に表流水の集水設備を設置する。

運搬時の対応

運搬車両、関連機材等の洗浄施設を設置する。また、運搬車両への岩石・土壌の積載時には、飛散防止に努め、運搬時には、荷台を防水シート等で覆う。

排水等の処理

工事および対策実施区域から発生する排水（集水設備からの放出水も含む）については、水質管理計画を定め適宜モニタリングを行い、必要に応じて適切な水処理を行う。水処理は、水質汚濁防止法および条例等に基づいた排水基準に適合するよう実施する。水処理施設は工事仮設備として設置するが、特に設備の能力・規模については予想される排水の水質、水量に応じて設定する。

また、必要に応じて粉じん等の処理設備の設置も検討する。

作業環境管理

作業員の健康への影響を防止するために、必要に応じて以下の対応を実施する。

- ・ 取り扱う岩石・土壌に関する作業員教育の徹底
- ・ 作業環境の測定
- ・ 対象物質とその濃度に応じた個人用保護具（作業着、ヘルメット、保護メガネ等（ゴーグル・保護面を含む）、安全靴、作業用手袋、耳栓、視認用ベスト、防塵マスク）の装着

周辺環境のモニタリング

施工前調査の結果に基づき、現場の状況や対象とする重金属等の種類・濃度に応じた環境モニタリング（排水、地下水、周辺の公共用水域の水質、大気等）の適切な計画と実施が必要である。地下水、公共用水域の水質モニタリングについては「第7章 モニタリング」を参照されたい。大気については、浮遊粒子状物質濃度を対象としてモニタリングを行う場合がある。（参考：（社）土壌環境センター編「土壌汚染と対応の実務」オーム社、2001）

対策実施の記録と管理

対策工の実施に関して、設計、施工の記録を行うとともに、対策実施区域であることを台帳等で管理する必要がある。台帳は原則として事業者が作成・保管するものとし、対策実施区域の位置、対策工の構造、対策された岩石・土壌の発生箇所、性状、各種試験結果、モニタリング施設の構造、モニタリング結果、各種図面類など、必要な情報を蓄積する。

(3) 施工計画時の留意点

施工において仮置き場を設ける場合には、現場状況を考慮し周辺環境に影響を与えないように適切に設置計画を立案する。特に、通常の土工に加え、迅速判定試験等を現場で実施し、対策が必要な岩石・土壌と対策が不要な岩石・土壌を分別する場合には、迅速判定試験の試験頻度と所要時間を考慮して、仮置き場の面積を十分に検討する必要がある。

第7章 モニタリング

7.1 モニタリングの目的

建設工事に伴って岩石・土壌に含まれる自然由来の重金属等により人の健康への影響が新たに発生する可能性がある場合、工事による水環境への影響と対策効果の確認、およびリスク評価結果の検証を目的として、地下水や表流水のモニタリングを行う。

モニタリングは施工前、施工中、施工後の各段階において実施する。施工前には対象地域における自然由来の重金属等のバックグラウンド値を把握し、施工中・施工後においては建設工事による水環境への影響や対策の効果等を確認する。また、モニタリングは地下水等の摂取と直接摂取による曝露経路を踏まえた地点、内容で行う。さらに、モニタリング結果については適切にその記録を保管する。

各段階におけるモニタリングの目的は以下の通りである。

施工前：バックグラウンド値の設定などを行うための基礎資料を得る目的で実施する。

施工中：建設工事による水環境への影響を確認するために行う。対策の施工を確実に実施するため、目視による点検もモニタリングに含める。

施工後：対策効果の検証、重金属等の拡散の有無の確認、およびリスク評価結果の検証を目的として実施する。モニタリング期間中はリスク評価の結果と比較・検証し、新たな対策の必要性が生じた場合は適切な対応を検討しなければならない。目視などの日常点検もモニタリングに含めて計画し、豪雨や地震などの緊急時には適切な対応を行うものとする。

7.2 モニタリングの計画

重金属等の種類・曝露経路・移行特性、対策の種類等を考慮して、適切な項目、手法、配置、頻度等を現地の状況に応じて決定し、モニタリング計画を立案する。

モニタリングは、施工前から施工中および施工後に至るまで一貫して計画、実施する。

(1) 施工前

施工前のモニタリングは、リスク評価や都道府県等の環境部局や周辺住民とのリスクコミュニケーションの基本資料となるので、対象地域の地形・地質条件、立地条件を十分考慮し、適切にモニタリング計画を立案する必要がある。

季節変動や多雨年と少雨年との差異を明らかにするために可能であれば着工前2～3年間の調査が望まれる。施工前モニタリングでは、計画されている建設工事の対象地域における河川水・湧水、湖沼水、地下水の調査とともに、必要に応じて対象地域における岩石・土壌の全含有量・溶出量バックグラウンド値を把握することが望ましい。なお、バックグラウンド値の長期変動を正確に把握するためには、施工前から継続して施工後も実施する必要がある。これらの調査項目、実施段階、調査目的を表7.2.1に示す。モニタリング位置から採水した試料について、分析前に0.45μmメンブランフィルターによりろ過を行い分析に供する。溶存イオンについては、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 HNO_3^- 、 HSiO_4^- など、重金属等については土壤汚染対策法に定める第二種特定有害物質（シアン除く）について測定する。

河川水・湧水、湖沼水、地下水のモニタリングの位置は、施工中や施工後にもモニタリングを継続することを考慮して選定する。河川水や湧水については、工事対象区域を含む流域の上流部と下流部でモニタリングを実施する。

表 7.2.1 モニタリングにおける周辺環境水の調査項目の実施段階と調査目的

調査項目	対象	実施段階			調査目的
		施工前	施工中	施工後	
流量	河川水、湧水				掘削工事にともなう湧水の影響を評価する。水質に関する各項目の測定結果とあわせて、ずり処理設備からの溶出現象および水-岩石反応の変化等の検討資料とする。
水位	湖沼水、地下水				掘削工事に伴う湧水の影響を評価する。地下水の水位測定は、対策工の種別により、その効果の確認に用いられる。また、水位変動にともなう水質変化の有無を把握する。
水温	河川水、湧水、湖沼水、地下水				各計測対象の水質の基本調査項目であり、pH、電気伝導度の温度補正に必要である。
pH	河川水、湧水、湖沼水、地下水				各計測対象の水質の基本調査項目であり、掘削工事による周辺環境水の水質変化を迅速かつ簡便に把握する。
電気伝導率	河川水、湧水、湖沼水、地下水				各計測対象の水質の基本調査項目であり、掘削工事による周辺環境水の水質変化を迅速かつ簡便に把握する。
酸化還元電位	河川水、湧水、湖沼水、地下水				水-岩石反応や各種元素の鉱物への吸着現象は、環境水の pH とともに酸化還元電位の影響を受けるため、生じている現象を推定するための資料とする。
浮遊物質	河川水、湧水、湖沼水、地下水				掘削工事やずり処理にともなう周辺環境水の汚濁の有無を確認する。
溶存イオン濃度	河川水、湧水、湖沼水、地下水				ずり処理設備内や地盤中で起っている水-岩石反応、吸着現象を推定するための資料とする。イオン種によっては対策工の効果の確認にも用いることができる。
重金属等濃度	河川水、湧水、湖沼水、地下水				第二種特定有害物質溶存量の現状を把握し、掘削工事やずり処理にともなうこれらの物質の拡散の有無を確認する。

自然由来重金属等への対応として重点的に実施

自然由来重金属等への対応として実施

自然由来重金属等への対応として必要に応じて実施

一般的な工事の水文調査として実施

一般的な工事の水文調査として必要に応じて実施

地下水の観測井については、対象とする帯水層の深度や流動方向を考慮して、ストレーナーの設置深度等を検討する（図 7.2.1）。また、地下水のモニタリングに際しては、影響が懸念される範囲に設置されている既設井戸も対象とすることが望ましい。サイト概念モデルに基づく評価地点においては、既設井戸あるいは新規の観測井で施工前からモニタリングを行うことが望ましい。

モニタリングの頻度は、水質・水位等の季節変動を把握するため、最低年 4 回実施する。降水量に対する水量、水位や水質の応答を把握することも重要であるため、月 1 回以上の頻度で計測することが望まれる。河川の流量、地下水位、pH、電気伝導率などの連続計測が可能な項目については、連続計測を行うことを必要に応じて検討する。

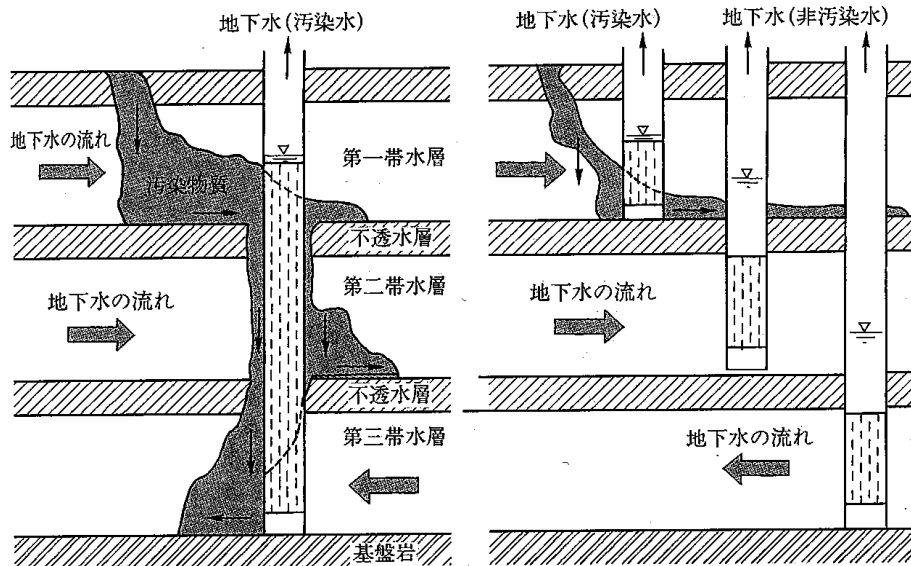


図 7.2.1 観測井の設置(左図:不適切な観測井, 右図:理想的な観測井)¹⁾

岩石・土壌については、地質学的・岩石学的特徴と河川水・地下水等の水質から、地球化学用シミュレーションソフト等（例えば米国地質調査所が無償供給する PHREEQC [http://wwwbrr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/index.html]）により、対象地域における水質形成機構のモデルを構築しておく、現在の水質がどのような反応系の変化を経て形成されたかを推定することができる。また、その結果に基づいて対策の選定、設計の科学的根拠を得ることも可能であるため、シミュレーションの実施に必要な項目についてモニタリングを実施してもよい。なお、建設工事による水環境への影響範囲が大きいと予想される場合、すなわち建設工事により重金属等を高濃度を含む流出水が河川に流入した場合の大量の魚の死、河道内の植物の枯死などが予想される場合は、当該流域の水質の特徴を把握するため、および施工後の広域的な地下水位低下にともなう周辺河川水等の水質変化を把握するために、当該流域以外の流域における河川水等の水質を適宜モニタリングすることが望ましい。

(2) 施工中

施工中においては、施工前と同様に建設工事の影響が考えられる範囲における河川水・湧水、湖沼水、地下水に関するモニタリング（表 7.2.1）と工事および対策実施区域外への排水についてモニタリングを実施する。発生源となる工事および対策実施区域内の湧水・浸出水に関しても必要に応じてモニタリング（表 7.2.2）を実施する。測定対象とする重金属等は、施工前のモニタリング結果やリスク評価（第 5 章）結果に基づいて設定すればよく、土壤汚染対策法に定める第二種特定有害物質をすべて計測する必要はない。また、モニタリング結果に応じて、施工中の排水の処理方法や仮置きした岩石・土壌への雨水の浸透防止、浸出水の処理方法の見直しを検討することができる。ただし、工事および対策実施区域外への排水について、当該工事や排水対象河川等に関連する法令および条例等がある場合は、それに従い測定項目や測定頻度を設定する。

施工前段階でモニタリングを実施した河川水・湧水、湖沼水および地下水については、同じモニタリング地点で同じ項目を継続して計測しなければならない（表 7.2.1 参照）。特に、工事および対策実施区域を含む流域の当該区域の上流部および下流部での計測が工事による影響の把握には重要である。測定頻度は月 1 回以上が望ましい。

表 7.2.2 工事および対策実施区域内の湧水・浸出水に関するモニタリング調査項目の実施段階と調査目的

調査項目	対象	実施段階		調査目的
		施工中	施工後	
流量	湧水、浸出水			ずり処理施設からの浸出水流量は、対策工によっては効果の確認に用いる。また、湧水や浸出水の処理が必要な場合にはその処理設備の容量の検討資料とする。
水温	湧水、浸出水			特にずり処理施設など地表部における温度変化による溶出成分の変化の有無を確認する。
pH	湧水、浸出水			各計測対象の水質の基本調査項目であり、湧水、浸出水の環境への影響の可能性を迅速かつ簡便に把握する。
電気伝導率	湧水、浸出水			各計測対象の水質の基本調査項目であり、湧水、浸出水の環境への影響の可能性を迅速かつ簡便に把握する。
酸化還元電位	湧水、浸出水			ずり処理設備内部および地盤中の酸化還元状態は、土や岩石の化学組成とともに溶出現象に影響するため、これを把握する。
浮遊物質	湧水、浸出水			湧水や浸出水の処理の必要性の有無を確認する資料とする。
溶存イオン濃度	湧水、浸出水			ずり処理設備内や地盤中で起っている水-岩石反応、吸着現象を推定するための資料とする。イオン種によっては対策工の効果の確認にも用いることができる。
重金属等濃度	湧水、浸出水			第二種特定有害物質溶存量の現状を把握し、ずり処理設備や掘削現場からの湧水、浸出水による重金属等の拡散の可能性を確認する。

自然由来重金属等への対応として重点的に実施

自然由来重金属等への対応として実施

自然由来重金属等への対応として必要に応じて実施

一般的な工事の水文調査として実施

一般的な工事の水文調査として必要に応じて実施

(3) 施工後

施工後には、建設工事による周辺環境への影響を把握するとともに、対策を講じた場合には、対策効果の確認や追加の対策の必要性の判断を目的としてモニタリングを実施する。施工後のモニタリング調査項目と調査目的は、**表 7.2.1** を参照されたい。

対策実施区域周辺の河川水・湧水、湖沼水、地下水については、施工後においても施工前および施工中からモニタリングを実施した箇所継続的に観測を行う。特に、自然由来の重金属等の影響が及ぶと考えられる表流水および地下水については、対策実施区域上下流それぞれ 1 カ所以上においてモニタリングを実施する。下流域の水質のみのモニタリングでは、その変化が対策実施区域からの溶出か、あるいは広域的水質変化かを判断することはできない。この時、上流部の水質モニタリングにおいても下流部と同様の水質変化が認められた場合には後者と判断することができる。これらの河川水・湧水、湖沼水、地下水のモニタリングは、水質が定常化するまでは、月 1 回程度以上の頻度で計測する必要がある。その後は、年 4 回程度の計測を実施し、季節変動を確認する。

また、施工後においては対策工の変状等についても定期的に監視する必要がある。対策の変状等に関する監視は、基本的に目視によるものとする。対策実施区域を盛土形状にした場合は、覆土の滑りや雨水による侵食などの監視が必要である。そして、豪雨や大きな地震後には変状がないことを目視等により確認することも必要である。

リスク評価結果の検証を目的としてモニタリングを行う場合には、対策実施区域直近でのモニタリングが必要となるが、対策によってはその観測井が雨水や大気への侵入経路となり、その効果が低減する可能性があることに留意する。

モニタリングの終了時期については、土壌汚染対策法では、地下水の季節変動（4 半期に一度の観測）に関するデータを最低でも 2 回にわたり取得するという安全側の考え方に基づき、2 年間対象物質濃度の計測値が基準値を上回らなければモニタリングを完了してもよいこととなっている。本マニュアルでは、モニタリングの完了時期については、季節変動を考慮して対策実施区域周辺で年 4 回程度の計測を行い、水位や水質がある程度一定となった

状態でのモニタリング結果がリスク評価の結果を上回らないことを2年以上確認すれば、モニタリングを完了してもよい。ただし、場合によっては自治体など関係機関や周辺住民との合意の上でモニタリング終了期間を設定する。また、モニタリングの完了を判定する計測値は、基本的に第5章のリスク評価で想定された保全対象個所の地下水の計測値とする。

【引用文献】

- 1) 中島誠(2001)：土壌・地下水汚染にどう対処するか，化学工業日報社．

7.3 モニタリング結果の利用と留意点

モニタリングの結果、重金属等の濃度の時間変化や分布を把握し、予測される濃度や分布との差異を比較することにより、拡散状況や対策の効果を確認する。モニタリング結果が予測と大きく異なる場合は、その原因を検討し、必要に応じてリスク評価の条件の見直しや再調査を行う。対策が十分ではないことが判明した場合は、対策の見直しを行う。

(1) モニタリング結果の利用

モニタリング結果は、工事および対策実施区域から外部への重金属等や酸性水の排出の有無の判定およびこれらの排出に対する対策工の効果の確認の判定に活用する。

施工中における工事および対策実施区域外への排出水の基準は、当該工事や放流対象河川等に関連する法令および条例等に従って設定する必要がある。また、施工前のモニタリング結果から表流水のバックグラウンド値を明らかにし、この値を基準とする方法もある。

施工後における敷地境界もしくは保全対象近傍における地下水、表流水モニタリングにおいては、施工前調査から得られるバックグラウンド値と環境基準値（表流水については「水質汚濁に係る環境基準について」（環境庁告示第 59 号、昭和 46 年 12 月 28 日）の「別表 1 人の健康の保護に関する環境基準」、地下水については「地下水水質汚濁に係る環境基準について」（環境庁告示第 10 号、平成 9 年 3 月 13 日）の「別表」）の高い方を基準値として採用する。なお、施工直後においては、施工中の地盤の攪乱等により水位、水質が大きく変動することも想定される。この場合には、水位や水質の変動がある程度一定となった時点で基準値と比較する。

施工中から施工後におけるモニタリングで得られた計測値とリスク評価結果で求められた値を比較して、モニタリング結果がリスク評価結果に比べて著しく大きい場合にはリスク評価を見直す必要がある。このような場合には、リスク評価結果とモニタリング結果が乖離した原因を調査したうえで、リスク評価を再度行い、必要に応じて追加の対策を実施する。なお、季節変動の影響は、施工前のモニタリングを適切に行うことによりサイト概念モデルにおいて考慮することが望ましい。一方、対策の変状等に関するモニタリングにおいては、一般的な盛土表面の維持管理における判断基準により判定を行うこととする。

(2) モニタリングの留意点

1) 流量・水位

建設工事における重金属等に対するモニタリングは、一般的な工事で行われる水文調査と併せて実施するのが望ましい。地下水位の計測において観測井の設置する場合、対象とする帯水層の特性や掘削条件などを十分考慮して適正な設備・機器および工法を選定することが望ましい。

建設工事によって周辺の河川流量が変化することが予想される場合、この流量の変化にともなう水 - 岩石・土壌反応の変化により重金属等の溶出現象が変化する可能性がある。この河川水質の変化への影響を検討するために、河川流量の調査が必要になることがある。

2) 水質

計測の留意点として、計測頻度が週 1 回程度以上になると、JIS によるイオン濃度や重金属等元素濃度の分析は時間的制約を受ける。分析精度が十分でないことを考慮して簡易分析手法を採用することとなる。この場合、月 1 回程度は公定法に則った手法による分析も行い、簡易分析手法の結果の妥当性を確認する必要がある。

3) 対策の形状監視

対策の形状監視において地すべり計などを設置する場合には、雨水や大気への侵入経路とならないように留意する必要がある。